

ディスカッション・ペーパー

産業の持続可能性に関する
日本、米国、欧州の相互分析
- 国際協業のために -

社会の発展に向けた
ヒューマン・マシン・インタラクションの活性化
に関する議論（フェーズII）

野中 洋一、ジョン ダイク、トーマス ハーン（編）



目次

目次	1
本書に寄せて	6
要約	10
プロジェクトチーム	13
用語と定義、略語と頭字語	14
1 はじめに	18
1.1 背景	18
1.2 動機	19
1.3 目標	20
2 産業の持続可能性に向けた、各地域の活動の現状	21
2.1 はじめに	21
2.2 日本の活動	21
2.2.1 産学官の連携	21
2.2.2 国レベルの取り組み	22
2.2.3 環境問題：地球温暖化とエネルギー枯渇	23
2.2.4 環境問題：資源枯渇と循環型経済	24
2.2.5 持続可能な社会に向けた課題	26
2.2.6 展望	27
2.3 米国の活動	29
2.3.1 2025 年以前：立法主導型、気候中心モデル	29
2.3.2 2025 年以降の産業持続可能性戦略	32
2.3.3 サマリ：米国の産業持続可能性戦略	37
2.4 欧州の活動	38
2.4.1 自律性	39
2.4.2 相互運用性	40
2.4.3 持続可能性	40

2.4.4	人間に焦点を当てること	40
2.4.5	ユースケース	42
2.4.6	IM-X でのグローバル協業ネットワーク	43
2.5	地域間の類似点と相違点	44
3	労働生産性、貿易の開放性、インセンティブ、労働の流動性.....	46
3.1	はじめに.....	46
3.1.1	世界の生産性の長期トレンド.....	46
3.1.2	貿易の開放性	48
3.2	日本の活動.....	49
3.2.1	労働生産性.....	49
3.2.2	インセンティブ	50
3.2.3	設備投資と人材育成の状況.....	51
3.3	米国の活動.....	52
3.3.1	製造業の労働生産性の包括的な分析.....	52
3.3.2	製造業の労働生産性の傾向	53
3.3.3	生産性と持続可能性の要因	54
3.3.4	生産性の世界比較	55
3.4	欧州の活動.....	56
3.5	地域間の類似点と相違点	58
4	新しい仕事／失われる仕事、ギグ・ワーク、人材戦略.....	60
4.1	はじめに.....	60
4.2	日本の活動.....	62
4.2.1	労働力不足の推計	62
4.2.2	未来人材会議	63
4.2.3	ギグ・ワークの現状と考察.....	66
4.2.4	スポット・ワーク市場の拡大と今後の課題	67
4.3	米国の活動.....	67
4.3.1	雇用の創出と喪失の動向	68

4.3.2	製造業におけるギグ・ワークの役割と動向	75
4.3.3	次世代の労働力のスキルアップ、再スキル化、育成	77
4.4	欧州の活動	80
4.4.1	スキルの置き換え需要と雇用の変化	80
4.4.2	デジタル・プラットフォーム労働者に対する政策	81
4.4.3	欧州における人的資本の課題	82
4.4.4	技能同盟	83
4.5	地域間の類似点と相違点	86
5	エネルギー／脱炭素／廃棄物問題	88
5.1	はじめに	88
5.2	日本の活動	89
5.2.1	グリーン成長戦略	89
5.2.2	グリーンイノベーション基金	90
5.2.3	循環型経済とマイクロプラスチック問題	92
5.2.4	経済安全保障と地域経済の活性化	94
5.2.5	デジタルインフラ	96
5.3	米国の取り組み	98
5.3.1	はじめに	98
5.3.2	米国のエネルギー需要の現状（2024～2026年）	98
5.3.3	需要曲線を動かす要因	100
5.3.4	長期展望（2035～2050年）	102
5.3.5	脱炭素化と産業持続可能性戦略	104
5.3.6	将来展望：2035年と2050年への道筋	104
5.3.7	脱炭素化の見通し：2025年以前と2025年以降の戦略	105
5.3.8	脱炭素化 – 比較軌跡	107
5.3.9	脱炭素化と循環型経済	108
5.4	欧州の活動	113
5.4.1	欧州グリーン・ディール	113

5.4.2	REPowerEU.....	115
5.4.3	グリーン・ディール産業計画.....	116
5.4.4	エネルギー危機に対処するための欧州の行動.....	118
5.4.5	マイクロプラスチック問題.....	120
5.5	地域間の類似点と相違点.....	121
6	未来の HMI.....	124
7	提言.....	136
7.1	第一の方向性（提案 1） DX による人間中心の仕事の強化.....	136
7.2	第二の方向性（提案 2） 機械が支えるべき本質的労働.....	137
7.3	第 3 の方向性（提案 3） 人と機械のコラボレーションのための ELSI.....	138
	あとがき.....	140
	付録 A. 欧州 RoX プロジェクト：データ駆動型ロボティクス.....	141
	付録 B. 米国における協働ロボットのインパクト.....	142
	付録 C. データスペース戦略議論と企業の準備状況.....	143
	参考文献.....	144

本書に寄せて



野中 洋一 プロジェクトリーダー

技師長

株式会社 日立製作所 研究開発グループ

ロボット革命・産業IoT イニシアチブ (RRI) メンバー

COVID-19 パンデミックは、人々のライフスタイルから価値観に至るまで、あらゆる面で大きな変化をもたらしました。パンデミック中に発生したサプライチェーンの混乱は、国内経済を優先する政策の台頭を促し、経済のブロック化を加速させる要因のひとつとなりました。さらに、パンデミック中で広まったリモートワークは、新たな働き方として社会に浸透し、雇用や教育に対する考え方も変えつつあります。また、ロシアのウクライナ侵攻によりエネルギー危機が深刻化した欧州や日本では、太陽光や風力などの自然エネルギーの政策と既存の化石燃料や原子力のエネルギー政策の関係の見直しを迫られています。

経済に目を向けると、日米欧では、人口ボーナスによる経済成長は過去のものとなり、社会のデジタル化を新たな成長ドライバーとして直近15年間に渡って掲げてきました。しかし、パンデミックやエネルギー危機などによる人々や社会の価値観の変化により、各地域の労働生産性は期待通りに向上していません。

このような状況の中で、8年前、ドイツと日本の専門家で集い、デジタル化が製造業に与える影響について議論し、論点を整理して今後の方向性を提言しました。しかし、社会が上記のような大きな変化を経験した今、改めて日米欧の専門家で集い、デジタル化に関する現状と課題を再度整理し、国際協力が必要となる課題を明らかにすることとしました。

本プロジェクトでは率直な議論が非常に活発に行われ、各地域の現状や政策の類似点と相違点を相互に評価しました。これにより喫緊に捉えるべき社会課題の共通認識が得られ、今後の国際協力への機運が高まったと感じています。本書の読者の皆様にも、当事者として理解を深め、今後の議論や活動に積極的に参加していただければ幸いです。



ジョン ダイク プロジェクト共同リーダー

CEO

Collaborative Ecosystem for Smart Manufacturing Innovation
Institute (CESMII), USA

世界的な混乱、人口動態の転換、そして急速なデジタル化という重なり合う局面を先進国がいかに乗り越えていくかという問いは、もはや理論的なものではなく喫緊の課題です。今日、私たちは前例のない変化の時代を生きています。地政学的不安定さが増加し、AI（人工知能）と自動化によって仕事の構造そのものが再定義されつつあります。こうした状況において、産業の持続可能性の追求は、もはや目標ではなく社会と経済のレジリエンス（回復力）の前提条件となっています。

本書は、日本、米国、ドイツの3つの先進国において、それぞれ異なるものの相互に関係する戦略を通じて、これらの課題にどのように取り組んでいるかを批判的に分析するものです。そして産業と社会の持続可能性を追求する上で、DX(デジタル・トランスフォーメーション)、政策イノベーション、そしてセクター横断的な連携が果たす役割を強調しています。人間中心で環境に配慮した産業エコシステムの推進に尽力する専門家、機関、そして地域の、長年にわたる思慮深い対話と協力の上に築かれたこの3地域の取り組みに参加できたことを、深く光栄に思います。

本書では、各地域が独自の視点を持ち寄っています。日本の Society 5.0 では、技術進歩と社会の幸福を統合し、デジタルツールがいかに生活の質を向上させるかに焦点をあてています。米国では、マニュファクチャリング USA などのイニシアチブを通じて、経済成長と環境管理のバランスをとるイノベーションと市場主導型のソリューションを重視しています。一方でドイツは、持続可能性、データ主権、倫理的ガバナンスに根ざした規制モデルを提言しており、これをインダストリー4.0 や Manufacturing-X などのプログラムに体现しています。これらの多様なアプローチとそれらを支える価値観を理解することで、相互に学習し政策を収束するための新たな機会を見出すことができます。

本書で最も重要なテーマの一つは、人と機械の協働がもたらす変革の可能性です。AI、ロボティクス、インテリジェント・システムなどのデジタル技術が進化を続けるにつれ、労働の本質、生産性、そして人材育成を再構築する能力も向上しています。しかし、本書が正しく強調しているように、自動化は人の可能性を奪うものではなく拡張するものでなければなりません。私たちは、労働者のエンパワーメント、スキルギャップの解消、そしてあらゆる実装レベルにおける倫理的配慮を組み込む方法で、生産システムを再構築しなければなりません。これには、地域によって大きく異なるものの、産業の未来に普遍的に関連する重要な倫理的、法的、社会的課題（ELSI: Ethical, Legal and Social Issues）への取り組みを含みます。

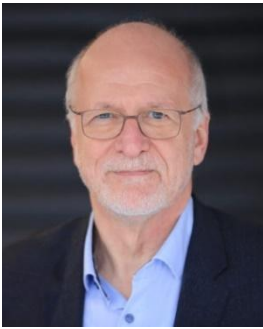
もう一つの重要なポイントは、産業の持続可能性は、技術だけでなく社会システムにも大きく関わっているという認識です。生産性の大幅な向上とエネルギーのレジリエンスの実現

には、技術革新以上のものが必要であり、このためには、政府、産業界、研究機関、そして地域社会の間の協調的な行動が不可欠です。米国の CESMII、日本の SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program、戦略的イノベーション創出プログラム) や Society 5.0 プログラム、ドイツの PI4.0 や Manufacturing-X といったイニシアチブは、いずれも国家戦略を地域のニーズや世界的な要請と整合させることの重要性を示しています。

取り組みの核となるのは、協力の原則です。本書で紹介する三国間パートナーシップは、知識を共有し、目標を一致させるための枠組みであるだけでなく、信頼、透明性、そして共通のビジョンの力を証明するものです。ますます分断化が進む世界において、このような協力は望ましいだけでなく、不可欠です。

読者の皆様には、本書の知見を批判的かつ建設的に評価していただきたいと思います。役員会、教室、政策フォーラムにおける議論のきっかけとなるよう願っています。投資、改革、そして行動のための参考資料として、そして触媒として活用していただきたいと思います。

私たちの産業システムは変革の途上にあります。前進への道筋は、慎重かつ思慮深く、そして協力的でなければなりません。本書は、この取り組みに有意義に貢献すると信じています。



トーマス ホーン プロジェクト共同リーダー

フェロー

シーメンス AG

Plattform Industrie 4.0 (PI4.0) メンバー

21世紀のデジタル世界は、国際協力の新たなパラダイムを必要としています。このデジタル世界における複雑な課題を乗り越えていく中で、持続可能な経済成長と技術進歩のためには、レジリエンスとグローバルな連携がこれまで以上に重要になっています。

さらに、高齢化と労働力減少は、先進国において経済の重大な課題となっています。組織や企業は、労働力の持続可能性を脅かす前例のない人口動態の変化に直面しています。この課題は、ますます技術主導のビジネス環境において、デジタルスキルに対する需要が加速していることで、さらに深刻化しています。例えば、AI、データ分析、DXなどの分野では、就業可能な人材と求められる専門知識のギャップが拡大し続けています。組織は、デジタル経済における競争優位性を確保しながら、この人口動態の課題に対処するために、戦略的な人員計画によって適応していく必要があります。

こうした状況において、レジリエンス、持続可能性、競争力という3つの柱が、成功するビジネス戦略の礎として重要性を増しています。組織はこれらの要素を慎重にバランスさせ、収益性だけでなく、環境に配慮し、急速な変化にも適応できる事業運営を確保する必要があります。このような世界的な課題に対応して競争力を維持するために、レジリエンスの強化、持続可能なオペレーションと生産プロセスの導入、そして俊敏な事業運営が求められます。

欧州では、ドイツのPI4.0やInternational Manufacturing-X (IM-X)イニシアチブなどの戦略的な国際連携を通じて、強固なグローバル・パートナーシップ・ネットワークを構築しています。私たちは、地域のニーズをより深く理解し、資源活用を最適化し、前述の課題に共に立ち向かい、互いに学び合い、対策を講じることができる協業ネットワークを構築していきます。

本書ではPI4.0イニシアチブを中心に、欧州の幅広い動向や知見も取り入れながら、インダストリー4.0の主要な視点を分析します。この包括的なアプローチにより、ドイツと欧州の産業変革の状況を深く理解することができます。

要約

本書は、労働生産性、労働人口の変化、そしてエネルギーやマイクロプラスチック問題といったプラネタリー・バウンダリーの観点から、日本、米国、欧州における産業の持続可能性に向けた取り組みを概観する。さらに、これら取り組みの類似点と相違点を評価し、特にデジタル化とヒューマン・マシン・インタラクション（Human-Machine Interaction, HMI, 人と機械の相互作用）による社会変革の加速の視点から国際協業の機会を提言する。

日米欧は、産学官連携を通じて経済成長を促進するためのデジタル化施策に取り組んでいる。注目すべき取り組みとしては、日本の SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program、戦略的イノベーション創出プログラム)、米国の Manufacturing USA ネットワーク、そしてホライズン・ヨーロッパやデジタル・ヨーロッパ・プログラムといった枠組みに基づく欧州のインダストリー4.0 関連プログラムが挙げられる。これらの取り組みは、製造業とデジタル技術を高度に統合して産業競争力を高めることだけでなく、高まる環境問題やエネルギー転換のニーズにも目を向けている。例えば、日本の Society 5.0 では、人口動態の課題に着目して、社会的なウェルビーイングや人間中心のイノベーションに重きを置いたサイバー・フィジカル空間の構築を目指している。米国は、脱炭素化をエネルギー安全保障、経済活力、イノベーションの道筋に結び付ける手段として、デジタル化と高度な製造業を重視している。一方で、多くの国を内包し経済状況も多様な欧州は、規制の枠組みと政策主導の持続可能性を重視し、包括的な政策と規制を通じて、環境と社会的課題に対する製造業の整合性を重視している。

2008 年の世界金融危機の後にインダストリー4.0 が提唱されたものの、3 つの地域における労働生産性は停滞している。金融危機の前の 1980 年代から 2000 年代の自由化の時代、日本、米国、欧州などの先進国では、開かれたグローバルな自由貿易を活用して、付加価値の高い生産活動を国内に維持しつつ、付加価値の低い生産工程を海外に移転することで生産性を向上してきた。しかし 2008 年の金融危機以降、地政学的リスクの高まり、貿易摩擦、サプライチェーンの脆弱性などにより、自由貿易の拡大は停滞し、従来の生産性向上策は変革を迫られた。こうした中、デジタル化、自動化、データ駆動型製造などにより生産性を向上させる枠組みとして、2011 年に提唱されたインダストリー4.0 は世界的な注目を集めているが、生産性向上の効果が社会的規模では未だ実現されていない。

また、脱炭素化・環境問題に関しては、3 地域すべてが温室効果ガス(GHG)排出量の削減、再生可能エネルギーの推進、循環型経済への移行、資源効率の向上、廃棄物の削減などに取り組んでいる。一方で、エネルギー戦略に関しては、各地域の状況に応じてアプローチが異なっている。日本では、地域のエネルギーミックス戦略に沿って、半導体製造拠点やデータセンターの建設の地方分散化を進めている。米国は変革期にあり、脱炭素化はもはや単なる排出量削減としてではなく、気候目標とエネルギー安全保障、経済活力、技術的リーダーシップのバランスをとる統合戦略として扱われ、産業競争力を維持しながら米国の世界的リーダーとしての役割を強化するという実際的なバランスを追及している。欧州は、エネルギーコストの高騰と地政学的リスクに直面しており、REPowerEU 計画を通じて、ロシアの化石燃料への依存度の低減、再生可能エネルギーの統合、加盟国間のインフラ整備の調和に取り組んでいる。

労働力に関しては、日本、米国、欧州共に、他の産業と比較したときにインセンティブが劣る点、知見を有する熟練者が高齢化している点など共通の課題を抱え、生成 AI、自動化、スマートシステムなどのデジタル技術が労働市場を急速に再編し、雇用の二極化を加速させ、労働を根本的に変えようとしている。本書では、労働を、限られた訓練を必要とする単純労働、体系的な教育と経験を通じて育成できる熟練労働、そして高度な創造力と分析力を必要とする労働の3つの領域に分類し、自動化と AI が、熟練労働が属する多くの中程度のスキルの職種を急速に代替する一方で、高度な創造力と分析力を必要とする高スキルの労働だけでなく単純労働が属する多くの低スキルの職種に新たな需要を生み出し、労働市場の二極化を加速していることを分析した。

この分析結果は、効率を高めるだけでなく、プラネタリー・バウンダリーの範囲内で社会的なウェルビーイングを確保するためにも、人と機械の間で労働をどのように分担するかを体系的に検討することが喫緊の課題であることを浮き彫りにしている。

特に、自動化と AI が、低スキルの労働市場を減少させるところか、むしろ増加させる可能性があることについて、真剣な議論が必要である。すなわち、低スキルの労働の多くは、収益が低いものの社会を支えるために不可欠な労働である一方で、近い将来においては技術力の不足やコスト的に見合わないなどの理由から、これを完全に自動化することが困難な可能性がある。さらに、そもそも人の能力と嗜好は多様であり、それらをすべて高スキルの労働として社会的に扱うことはできない。つまり、産業の持続可能性とウェルビーイングのためには、多様な能力と嗜好を有するすべての人間が社会的な役割に参加し、個々の心理的な満足感を持って社会に受け入れられる必要がある。

また、自動化と AI に関して、生成 AI、ロボティクス、自動化によって推進される高度な HMI システムの導入では、深刻な ELSI (Ethical, Legal and Social Issues、倫理的、法的、社会的課題) を引き起こしている。背景には、ELSI に関わる文化的な価値観、規制の枠組み、ガバナンスの考え方などが地域ごとに異なる問題がある。

これらの課題解決に向けた目標として、私たちは「ハーモナイズド共生社会」というビジョンを示した。このビジョンでは、人と機械の共生を基盤として、環境、ウェルビーイング、経済成長が調和した社会を実現することを目指している。

この議論の中で浮かび上がったのは、技術、労働、持続可能性といった複雑な課題に取り組むための重要な統合フレームワークのひとつである HMI の役割である。この HMI の進化を促すため、スマート製造に携わる企業経営者、政府の政策立案者、労働と産業の持続可能性に着目している研究者に向けて、我々は以下3つの戦略的提言を示す。

1, DX による人間中心の仕事の強化

デジタル技術を活用して、人の能力を拡張し、有意義な雇用へのアクセスを拡大し、労働力への参加意欲を高めることで、持続可能で公平な、人間中心の産業経済における仕事の役割を再定義すること。

2. 機械がサポートすべき労働の定義

社会的に不可欠な労働の職種における役割を特定し、エンパワーメントし、支援すること。これらの役割には、産業の持続可能性と社会のレジリエンスに直接貢献する公共サービスや環境サービスを含む。

3. 人と機械の協業のための ELSI

持続可能で公平な産業の発展のために、包括的で相互運用可能なシステムを設計できるように、日本、米国、欧州の ELSI に関する懸念を特定、分類、調整すること。

日本、米国、欧州の3地域が協力することは、高度な HMI がもたらす経済的、倫理的、法的、社会的な複雑性に集団で対処するまたとない機会を提供する。このパートナーシップを通じて、透明性、説明責任、アルゴリズムによる公正さ、データガバナンスといった基本原則を一致させるための合同 ELSI タスクフォースを設立することができる。また、国境を越えた相互運用性を維持しながら、各地域がそれぞれの社会的価値観に合わせた倫理的セーフガードを導入できるような、統合されたガバナンスモデルの開発を支援することもできる。リスクの高い HMI アプリケーションの認証・監査メカニズムを共同開発することで、社会的信頼性と規制の整合性を強化することもできる。さらに、国際的な知識共有プラットフォームを構築することで、複数の AI を連合させたシステムを通じて、各地域が規制の自主性を維持しつつ、共有された基準に基づいて運用することが可能となり、集合的学習、積極的なリスク軽減、AI 技術の責任あるグローバルな拡大を促進することができる。

プロジェクトチーム

リーダー／共同リーダー

- 野中 洋一 株式会社 日立製作所 RRI メンバー
- ジョン ダイク CESMII CEO
- トーマス ハーン シーメンス AG PI4.0 メンバー

メンバー

- 木村 文彦 東京大学 RRI メンバー
- 近藤 伸亮 東京大学 RRI メンバー
- 高本 仁志 産業技術総合研究所 RRI メンバー
- 安本 雅典 横浜国立大学 RRI メンバー
- ラグ アティナヤナン パデュー大学 ウェスト・ラファイエット インディアナ州 CESMII メンバー
- スダーサン ラチュリ 米国エネルギー省 CESMII メンバー
- オスカル ラザロ イノバリア協会 SM4RTENANCE 製造データスペース プロジェクト・コーディネーター
- シッコ レーマン-ブラウنز シーメンス AG PI4.0 メンバー
- ピーター リッゲスマイヤー フラウンホーファー研究機構 IESE インダストリー4.0 研究評議会 科学スポークス・パーソン
- マルク ホイスケ ドイツ機械工業連盟 PI4.0 メンバー

協力

- リ シンギュ パデュー大学 ウェスト・ラファイエット インディアナ州
- 太田 順 東京大学
- マティアス リースケ 日立ヨーロッパ GmbH
- ウェイ ユアン 日立アメリカ社
- 高橋 清隆 株式会社 日立製作所
- 中島 一雄 RRI

用語と定義、略語と頭字語

AI	Artificial Intelligence, 人工知能
AIROA	AI Robot Association in Japan, 日本 AI ロボット協会
ARPA-E	Advanced Research Projects Agency-Energy, the U.S., 米国エネルギー高等研究計画局
bcf/d	billion cubic feet per day, 天然ガスの量を表現する単位。
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien, Germany's Digital Association, Germany, ドイツ情報通信メディア連盟
BLS	Bureau of Labor Statistics, the U.S., 米国労働統計局
BOTTLE	Bio-Optimized Technologies to keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment consortium, the U.S., 米国生分解性プラスチック技術コンソーシアム
BPMN	Business Process Model and Notation, ビジネスプロセスモデリング表記法
BRL	Business Readiness Level, ビジネス成熟度
BTU	British Thermal Unit, エネルギーの単位の一つ。1 ポンドの水を 1 華氏度温度上昇させるのに必要な熱エネルギー。
CAD	Computer-Aided Design, コンピュータ支援設計
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism, EU, 炭素国境調整措置。EU が導入した制度で、EU 域内で生産される製品に課される炭素価格に対応して、EU 域外から輸入される製品にも同様の炭素価格を課すもの。
CCS	Carbon Capture and Storage, 二酸化炭素回収・貯留
CCUS	Carbon dioxide Capture Utilization and Storage, 二酸化炭素回収・利用・貯留
CESMII	Collaborative Ecosystem for Smart Manufacturing Innovation Institute, the U.S., スマート製造イノベーション協働エコシステム研究所、米国
CFE	Carbon Free Energy, カーボン・フリー・エネルギー
CHIPS	Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors for America, 米国半導体製造促進法
COVID-19	Coronavirus Disease, 新型コロナウイルス感染症
CSR	Corporate Social Responsibility, 企業の社会的責任
CSTI	Council for Science, Technology and Innovation of Japan, 日本科学技術イノベーション会議

DOC	Department of Commerce, the U.S., 米国商務省
DOD	Department of Defence, the U.S., 米国国防総省
DOE	Department of Energy, the U.S., 米国エネルギー省
DevOps	ソフトウェア開発（Dev）チームと IT 運用（Ops）チームの作業を統合・自動化することで、高性能なアプリケーションやサービスの提供を加速させるソフトウェア開発手法(ref. https://www.ibm.com/think/topics/devops)
DX	Digital Transformation, デジタル・トランスフォーメーション
EIA	Energy Information Administration, the U.S., 米国エネルギー情報局
EISA	Energy Independence and Security Act, the U.S., 米国エネルギー独立安全保障法
ELSI	Ethical, Legal, and Social Issues, 倫理的・法的・社会的課題
EPA	Environmental Protection Agency, the U.S., 米国環境保護庁
EPRI	Electric Power Research Institute, the U.S., 米国電力研究所
ESG	Environmental, Social, and Governance, 環境・社会・ガバナンス
EV	Electric Vehicle, 電気自動車
FA	Factory Automation, 工場自動化
GDP	Gross Domestic Product, 国内総生産
GHG	Greenhouse Gas, 温室効果ガス
GX	Green Transformation, グリーン・トランスフォーメーション
HCPS	Human-Cyber-Physical Space, 人・サイバー・物理空間
HMI	Human-Machine Interaction, 人と機械の相互作用
HPC	High-Performance Computing, 高性能計算
IEA	International Energy Agency, 国際エネルギー機関
IM-X	International Manufacturing-X, EU, 欧州国際製造イノベーション
IRA	Inflation Reduction Act, the U.S., 米国インフレ抑制法
IT	Information Technology, 情報技術
JASM	Japan Advanced Semiconductor Manufacturing, Inc., 日本先端半導体製造株式会社
JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association, 電子情報技術産業協会
JST	Japan Science and Technology Agency, 科学技術振興機構

LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory, 米国ローレンス・バークレー国立研究所
LNG	Liquefied Natural Gas, 液化天然ガス
LTRA	Long-Term Reliability Assessment, 長期信頼性評価
MEP	Manufacturing Extension Partnership, 製造業支援パートナーシップ
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, 経済産業省
NAICS	North American Industry Classification System, 北米産業分類システム
NEDO	New Energy and industrial technology Development Organization, Japan, 新エネルギー・産業技術総合開発機構
NERC	North American Electric Reliability Corporation, the U.S. 北米電力信頼性協会
NIST	National Institute of Standards and Technology, the U.S. 米国標準技術研究所
NMPs	Nano- and Microplastics, ナノ・マイクロプラスチック
NREL	National Renewable Energy Laboratory in the U.S., 米国国立再生可能エネルギー研究所
NSF	National Science Foundation, the U.S., 米国立科学財団
O-CEI	Open CloudEdgeIoT Platform Uptake in Large-Scale Cross-Domain Pilots, 欧州委員会 ホライズン・ヨーロッパプログラムによる大規模クロスドメイン実証のためのオー プンクラウドエッジ IoT プラットフォーム(ref. https://www.linkedin.com/company/o- cei-horizon/)
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development, 経済協力開発機構
OJT	On-the-Job Training, 職場内訓練
PPP	Public-Private Partnerships, 官民パートナーシップ
quad	エネルギーの単位。約 1 兆 BTU。
RFS	Renewable Fuel Standard, 再生可能燃料基準。米国連邦プログラムで輸送燃料に二酸 化炭素を組み込むことを義務付けているもの。
REMADE	Reducing Embodied-energy And Decreasing Emissions institute, the U.S., 米国省エネルギー・排出削減研究所
RoX	ドイツの AI ロボットシステム活用イニシアチブ(ref. https://roboception.com/wp- content/uploads/202410_RoX-PressRelease_final_EN.pdf)
RRI	Robot Revolution & Industrial IoT Initiative, Japan, ロボット革命・産業 IoT イニシアチブ、日本

R&D	Research and Development, 研究開発
SAFS	Sustainable Agriculture and Food Systems, the U.S., 米国持続可能な農業・食料システム
SDGs	Sustainable Development Goals, 持続可能な開発目標
SEC	Securities and Exchange Commission, the U.S., 米国証券取引委員会
SIP	Strategic Innovation Promotion program, 戦略的イノベーション創造プログラム
SMEs	Small and Medium Enterprises, 中小企業
SMMs	Small and Medium-sized Manufacturers, 中小製造業者
SMR	Small Modular Reactors, 小型モジュール原子炉
SysML	Systems Modeling Language, システムモデリング言語
STEM	Science, Technology, Engineering, and Maths, 科学・技術・工学・数学
TIPC	Training for Improving Plastics Circularity, プラスチック循環性向上のための研修
TRL	Technology Readiness Level, 技術成熟度
TTF	Title Transfer Facility, タイトル・トランスファー施設
UML	Unified Modeling Language, 統一モデリング言語
USDA	U.S. Department of Agriculture, 米国農務省
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, German Engineering Federation, ドイツ機械工業連盟
VET	Vocational Education and Training, 職業教育訓練
WEF	World Economic Forum, 世界経済フォーラム
WTO	World Trade Organization, 世界貿易機関
ZEV	Zero-Emission Vehicle, ゼロエミッション車
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie, German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, ドイツ電気電子工業会
3E+S	Energy security, Economic efficiency, Environment, and Safety as the fundamental concept behind Japan's energy policy, 日本のエネルギー政策の基本理念である、 エネルギー安全保障・経済効率性・環境・安全性
3R	Reduce, Reuse, Recycle, リデュース・リユース・リサイクル

1 はじめに

1.1 背景

2017年、インダストリー4.0が、ITを活用した機械とプロセスのインテリジェントなネットワーク化の活動として認知され始めた頃[1]、このイニシアチブでもたらされるイノベーションが人と機械の関係をどのように変容させるのか、技術の進歩とその社会的応用によって変化してきた労働のあり方が今後どのように変化していくのかという議論が、日本とドイツの専門家間で提起された。これが契機となり2018年から2019年夏にかけてドイツと日本から関連する技術の専門家だけでなく、社会学者、心理学者、労働組合など多様な専門家が集まり、HMIの将来について議論し、2019年にディスカッション・ペーパーを発表した[2]。

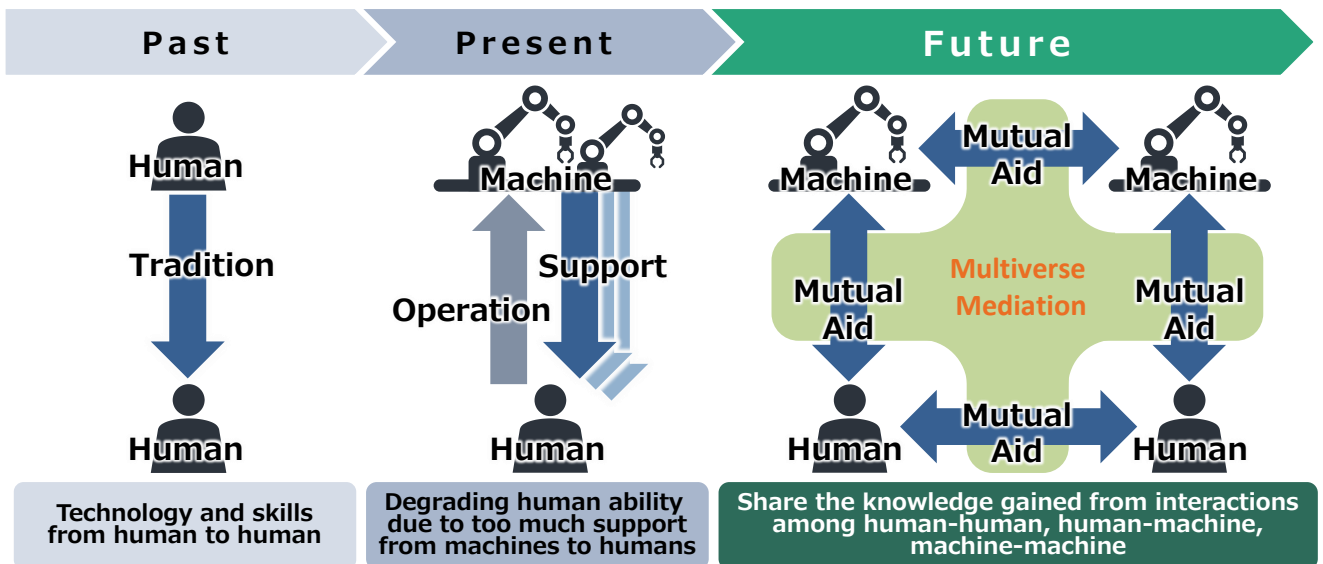


図1 – 先回プロジェクトで示したマルチバース・メディエーション[2]

図1は、前回のプロジェクトの結果として、技術の進歩によって人間社会がどのように変化し、今後どのように変化していくか、技術・スキルの伝承という観点から示したものである。かつては、技術やスキルは人から人へと受け継がれてきたが、現在では、インターネットやコンピュータ、そしてAIを含めた機械が、生活のあらゆる場面で人を支えている。しかし機械の過剰なサポートは人が本来持つべき機能を損なう危険性が指摘されており、個人と人間社会の持続的成長につながるHMIのあるべき姿を模索する必要があることを示した。

前回のプロジェクトでは、将来像として、人と人、人と機械、機械と機械の間で等しく技術やスキルの相互利用を可能にする社会インフラを構築する必要があると主張し、これをマルチバース・メディエーションと名付け、人と機械が互いに助け合う持続可能な社会を構想した。つまり、人は、機械との共存の下で、以下のような機能を確立する必要性を訴えた。

- ・誰もが AI や機械を通じて創造性を発揮し、社会に貢献できる世界
- ・ AI や機械に支えられ、誰もが余暇を楽しみ、個性を発揮できる世界

1.2 動機

産業の持続可能性に関しては、インダストリー4.0 や SDGs（持続可能な開発目標）が提唱され、その中で現在も検討が進んでいる。しかし、インダストリー4.0 が提唱された当時は、SDGs との関係について公に議論されたことはなかった。インダストリー4.0 は、2011 年 11 月にドイツ政府が発表した戦略施策のひとつである「ハイテク戦略 2020 アクションプラン」[3]の一環として示され、2013 年 4 月には BITKOM、VDMA、ZVEI の 3 団体が PI4.0 の運用を開始した。

一方で SDGs は 2015 年 9 月に国連総会で採択された持続可能な開発のための 17 の国際目標である[4][5]。つまりインダストリー4.0 は SDGs より先に提唱されたため、インダストリー4.0 の目標と SDGs の目標との関係については未だ十分に議論されていない[6]。このような背景から、前回のプロジェクトでは、デジタル化と持続可能な社会の関係について、HMI の視点から課題を整理し、今後の方向性を提案した。

前回のプロジェクトの後、COVID-19 のパンデミックが世界を襲い、ライフスタイルから価値観まで大きな変化をもたらした。パンデミックの際に生じたサプライチェーンの混乱は、国内経済優先の政策の台頭により未だ収束していない。さらに、パンデミックで広まったりリモートワークは、新たな働き方として社会に浸透しつつあり、雇用や研修に対する考え方も変わりつつある。

このような視点から世界を見渡すと、例えば、2024 年 1 月にダボスで開催された WEF 年次総会のアジェンダには、以下のように記されている[7]。

1. 分断された世界における安全保障と協力の達成

世界は、地政学的緊張の高まりによって複雑化した世界貿易の新たな集中に直面している。

2. 新時代の成長と雇用の創出

地政学的不安定性の増大と気候変動危機、そして AI の加速化によって、新たな経済の枠組みが到来した。

3. AI が経済と社会の原動力となる

2023 年は生成 AI が広まる年である。

4. 気候、自然、エネルギーの長期戦略

また、2024 年 9 月に発表された IMF 年次報告書 2024 では、以下の主要メッセージを提示している[8]。

現在の課題は2つある。第1は、さらなる地政学的ショック、破壊的な財政調整やインフレ率を目標値に戻す作業からマクロ経済の安定を守ることである。相次ぐ危機を抱えたまま生き続ける人々は、最も強い混乱を経験した低所得国と同様に、継続的な支援を必要とするだろう。気候変動、デジタル化、AI革命など、良きにつけ悪きにつけ、労働のあり方を再構築しかねないものである。こうした変革には、リスクを軽減し、チャンスを最大限に生かすための多国間協力が必要となる。

つまり、パンデミック後の世界では、インダストリー4.0の果実を得るには程遠い「複合危機」にあり、環境災害は深刻化し、地政学的リスクは実体経済に影を落とし、人の生産活動そのものの問題は山積しているのである。このような状況の中、前プロジェクトでゴールイメージとして掲げた「マルチバース・メディエーション」を実現するためには、いくつかの現実的な課題に直面しなければならない。例えば、地球上の資源や労働力の偏在を考えると、単純な知識の相互共有は所得格差を加速させかねない。また、単に他者から知識を共有するだけでは、望ましい結果が得られず、相互不信を招き、地理経済的な分断を加速させるかもしれない。

1.3 目標

産業の持続可能性として、本書では製造業を取り巻く持続可能性の問題とその解決策を扱う。そのため、デジタル技術による生産性や労働力の変遷、仕事や教育の変化について議論する。さらに、エネルギー問題、脱炭素化問題、廃棄物問題など、プラネタリー・バウンダリーの側面についても議論する。

産業の持続可能性の要件として、ウェルビーイングの追求し、利用可能な資源に対する様々な制約条件を満たす産業活動のイノベーションが必要である。また、制約条件としては、プラネタリー・バウンダリーのような絶対的条件も必須である一方、**制約であり資源でもある人間、技術、文化、社会、地政学的条件などは、ある程度は変化させ、統御できるとし、この前提で、日米欧の制約条件での相似性と相違性を評価し、どのように変え、統御できるのか、を、本書では議論する。**

産業の持続可能性の実現には様々なアプローチがあるが、HMIは根本的に重要である。日本、米国、欧州のいずれにおいても、人と機械の物理的・知的な不整合が膨大な無駄を生み出している。この課題を解決するには、**人の身体的・知的多様性を認識し、人と機械が適応的に共存することで、無駄を減らし、人と機械の共生を最適化する仕組みが重要である。**

そのために、**日米欧の現状と施策において、人および人を取り巻く技術、文化、社会、地政学的条件、および変革や統御の可能性の相似性と相違性を評価して、日米欧の共通の解決策を本書では議論する。**また、以上の議論を一般化することで、グローバル・サウス等と日米欧の関係の課題を検討することができるかもしれない。

この方針の下、ウェルビーイングとプラネタリー・バウンダリー双方の現状と課題を議論し、産業の持続可能性に貢献するHMIのあるべき姿と要件を明らかにし、今後の国際協力に向けた提言をまとめる。

2 産業の持続可能性に向けた、各地域の活動の現状

2.1 はじめに

日米欧では、人口ボーナスによる経済成長は過去のものとなり、社会のデジタル化を新たな成長ドライバーとして直近15年間に渡って掲げてきた。しかし、パンデミックやエネルギー危機などによる人々や社会の価値観の変化により、各地域の労働生産性は期待通りに向上していない。

一方で、デジタル化はデータへのアクセスや効果的な活用に苦慮する個人や企業に大きな格差を生み出している。さらに、AIの利活用における大衆操作のリスクや地政学的競争など、デジタル化の負の側面が実体経済に影響を及ぼしている。

本章では、経済成長の原動力としてのデジタル化施策と、それに伴う社会的課題への対応策の両面から、日米欧の取り組みを取り上げ、その共通点と相違点を評価する。これを通じて、急速に変化する世界における持続可能な発展への道筋を模索する。

2.2 日本の活動

日本における産業の持続可能性に向けた主なプログラムやプロジェクトを、産学官連携、地球温暖化とエネルギー枯渇、資源枯渇と循環型経済、持続可能な社会問題の観点から述べる。日本社会はどちらかというと持続可能性の問題に敏感であり、その活動を推進することに積極的である。政府主導のプログラムやプロジェクトは、その前段階として挑戦的な課題を調査し、社会と産業界に現実的な重要性を納得させる重要な役割を果たしている。産業界は、社会貢献や事業性を考慮し、これら持続可能性に関する活動に投資している。

2.2.1 産学官の連携

近年、日本は深刻な地球温暖化、資源の枯渇、廃棄物の増加、環境汚染など、社会的なウェルビーイングを低下させる様々な社会課題に直面しており、昨今の不安定な地政学的情勢により深刻度を増している。このような状況は米国や欧州など工業的に高度に発展した国々で共通している。これに対し、日本の産業界は政府、学界と共同で、産業の持続可能性を最優先課題の一つとしている。

産業の持続可能性は、地球規模の環境とプラネタリー・バウンダリーの観点から、また同時に社会的福利、人の多様性と包摂の観点から考える必要があり、解決のためには技術開発とその社会的適用における人視点での配慮が必要である。これに対し、過去数十年間、日本は産学官共同で多くのプログラムやプロジェクトを進めてきたが、近年の環境問題や社会問題は多様化し増大しており、多くの問題が未解決・未対処になっている。

2.2.2 国レベルの取り組み

国レベルでは、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が最高位の会議であり、産学の科学技術振興に関する国の方針を決定している。CSTIは5年ごとに科学技術・イノベーション基本計画を決定し、その中で、Society 5.0は、第5期科学技術基本計画で国家ビジョンとして、サイバー空間と物理空間が高度に統合されたシステムによって経済発展と社会的課題の解決が両立する人間中心の社会として提唱された。第6期科学技術・イノベーション基本計画[9]では、Society 5.0のコンセプトを具現化・実現するために、「脅威や予測不可能で不確実な状況に対して持続可能で強靱な社会、人々の安全と安心を確保し個人が多様な幸福を実現できる社会」を構想し、産業の持続可能性をテーマとする多くのプログラムやプロジェクトが推進されている[10]。

最も重要かつ包括的な国家プログラムは、省庁横断のSIP[11][12]である。SIPは、様々な産業／技術領域にわたる学際的なプロジェクトであり、産業の持続可能性は重要なテーマの一つである。また、SIPは産学官連携による基礎研究から社会実装までの研究開発を包含しており、テーマ毎に優秀な人材やノウハウを1つの拠点に集約して組織化することを意図している。この中で産業界の持続可能性に関連するプロジェクトは、2.2.4章と2.2.5章に紹介されている。

またSIPに加え2つの補完的プログラムがある。ひとつはムーンショット研究開発プログラムで、社会問題に大きなインパクトをもたらすと期待される野心的な目標やビジョンを推進し、SIPにつなげることを目的としている[13]。もうひとつは、目指す姿であるSociety 5.0と研究開発のギャップを埋めるために、SIPの成果をフォローアップし経済的・社会的価値を生み出すBRIDGEである[14]。

持続可能な社会の実現に向けた国家ビジョンとして、環境省は2024年に第6次環境基本計画を策定した[15]。同計画では、環境政策を起点として、以下のような様々な経済的・社会的課題を同時に解決することを目標としている。

- 環境保全と個人の幸福・生活の質を追求
- 再生可能な資源に基づく循環と共生による環境負荷の総量削減
- 経済・社会成長の新たな道を実現

産業の持続可能性の具体的な課題に応じて、各省庁やその課題に関連する産業団体が多くの産学官連携プロジェクトを組織しており、いくつかのプロジェクトを以降の章で紹介する。

一般的に、産学官連携プロジェクトは、「ファーストペンギン」（リスクを恐れず新しいことに最初に挑戦する者）の役割を果たし、産業の持続可能性に関する潜在的な有用性を検証する。プロジェクトの結果が有望であると評価された場合、産業界の強力な参加により実用化が進められる。

2.2.3 環境問題：地球温暖化とエネルギー枯渇

日本は人口密度が高く、高度に工業化された国であり、天然資源に乏しい。日本の産業界と社会は長年にわたり地球温暖化とエネルギー枯渇に悩まされており、産業の持続可能性に寄与するエネルギー消費を節約するため、様々な対策に取り組んできた。

経産省は2025年に第7次戦略的エネルギー計画を発表した[16]。同計画は、図2に示すように、再生可能エネルギー、原子力、従来型火力など、現実的なエネルギーミックスを検討し、国家安全保障の観点から国のエネルギー政策の全般を記述したものである。この計画では、産業界のデジタル化の拡大によるエネルギー使用量の増加についても言及している。

内閣府は、長期的なグリーン・トランスフォーメーション（GX）活動と投資計画を示すGX2040ビジョンを発表した。ここでは、革新的なGX技術による産業再編、再生可能エネルギーの供給と消費の適切な地方分散、成長志向の投資政策、地球環境と調和したカーボン・ニュートラルへの実践的移行などが述べられている。

また、昨今の世界的な脱炭素化規制の厳しさを受け、日本政府は2035年までにCO2排出量を2015年比で60%削減するという目標を掲げている。これは非常に野心的な目標であり、日本政府は、技術開発だけでなく、さまざまな財政的措置や法的措置を含む多くのプログラムやプロジェクトを組織して産学共同で取り組んでいる。

カーボン・ニュートラルに向けた国の基本計画には、例えば以下のようなものがある。

- 内閣府が策定した気候変動に関する政策
- 環境省による地球温暖化対策基本計画[17]
- 環境省による気候変動適応情報プラットフォーム
- 経産省が策定したGX基本計画[18]

		(FY2019 ⇒ previous energy mix)	Energy mix in FY2030 (ambitious outlook)
Energy efficiency improvement		(16.55 million kl ⇒ 50.30 million kl)	62 million kl
Final energy consumption (without energy conservation)		(350 million kl ⇒ 377 million kl)	350 million kl
Power generation mix	Renewable energy	(18% ⇒ 22-24%)	36-38%
Electricity generated: 1,065 TWh ⇒ Approx. 934 TWh	Hydrogen/Ammonia	(0% ⇒ 0%)	1%
	Nuclear	(6% ⇒ 20-22%)	20-22% (details of renewable)
	LNG	(37% ⇒ 27%)	20%
	Coal	(32% ⇒ 26%)	19%
	Oil, etc.	(7% ⇒ 3%)	2%
(+ non-energy related gases/sinks)			
GHG reduction rate		(14% ⇒ 26%)	46%

Continuing strenuous efforts in its challenge to meet the lofty goal of cutting its emission by 50%

図2 - エネルギーミックスの見通し（2024年）[16]

また、日本政府の助成機関は、産業界が二酸化炭素の排出削減と省エネルギーの実用的な開発を進めるための多くの支援プログラムを設けており、例えば以下のようなプログラムが挙げられる。

- カーボン・ニュートラル社会に向けた社会シナリオ研究プログラム[19]、科学技術振興機構（JST）
- 革新的 GX 技術創出事業(GteX)[20]、JST：電池、水素、バイオ製造など
- 先端的カーボン・ニュートラル技術開発プログラム(ALCA-NEXT)[21]、JST：エネルギー貯蔵、グリーンバイオテクノロジー、グリーンコンピューティングなど
- 二酸化炭素回収・貯留（CCUS, Carbon dioxide Capture Utilization and Storage）実証[22]、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

また経産省主導の「2050年のカーボン・ニュートラル達成を通じたグリーン成長戦略」[23]の下で、産業界が緊密に議論するための以下のような産業コンソーシアムが組織されている。

- GX リーグ[24]、経産省：
2050年のカーボン・ニュートラル実現に向けた経済社会改革を目指す
- グリーン×デジタルコンソーシアム[25]、電子情報技術産業協会（JEITA）：
CO2 見える化フレームワークなど

化石燃料の消費を抑え、CO2 排出量を削減するために、太陽電池や風力発電などの再生可能エネルギーは、国際社会で注目されている。しかし、日本では太陽電池の設置に適した土地が限られていることや、風況が不安定であることなどから、これらの再生可能エネルギーを実用的な規模で導入することは容易ではなかった。近年、技術の進歩や政府による財政的・法的支援により、日本のエネルギー源に占める再生可能エネルギーの割合は増加している[26]。そして再生可能エネルギーの最前線に追いつくために新たな技術開発が続けられている。

また、持続可能なエネルギーへの転換を加速させるためには、技術開発だけでなく産業界を導くための政府の法的措置や政策、経済的インセンティブなどが重要であり、例えばカーボン・プライシングや化石燃料使用に対する追加料金などが検討されている。

2.2.4 環境問題：資源枯渇と循環型経済

日本は多くの重要な天然資源に乏しく、それらを輸入しなければならない。しかし、近年の環境問題や地政学的問題により、外国の天然資源への依存度を下げることが求められている。更に、使用済み製品や廃棄物、例えば使用済み電子部品や廃棄プラスチックなどを発展途上国に輸出することも難しくなっている。

一般的に、環境保護の観点からは、全体的な物の流れをできるだけ少なくし、廃棄物処理や焼却を完全になくすことが必須である。過去 20 年間、日本の政府と産業界は、自動車、家電製品、事務機器などの使用済み製品リサイクルの法制化に集中的に取り組み、リデュース（削減）、リユース（再使用）、リサイクル（再資源化）を意味する「3R」というキーワードで意

識づけを行ってきた。リデュースとリユースは環境に配慮する取組みを敷衍することが主旨だが、リサイクルや産業や社会の慣行となるためのものである。

最近では、製品のライフサイクルとマテリアルフローを包括的に再編成する循環型経済が提唱され、現実的な実現可能性と社会的な実施のために新しいビジネスモデルが議論されている。また循環型経済のプロセスには 3R の概念が組み込まれ、リデュースとリユースに関わる様々な取組みが検討されている。

2024 年、日本政府は第 5 次循環型社会形成推進基本法を制定した。図 3 に示すように、この法律は 2003 年以降で逐次見直され、現在では国家戦略として、循環型経済[27]の概念を包括的に実施することにより、環境負荷だけでなく経済的便益や社会的福利の向上を目指している。また物質循環と社会的便益については定量的措置が規定されている。

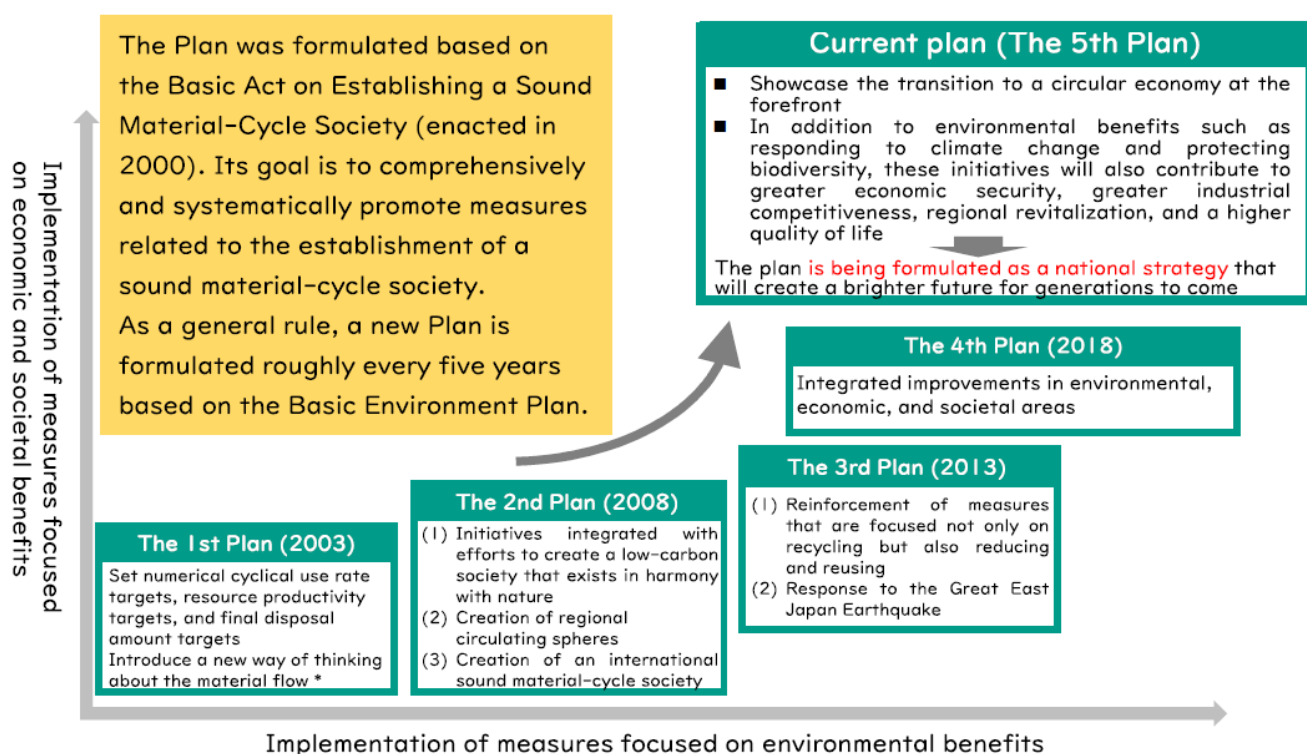


図 3 - 循環型社会形成推進基本法の変遷[27]

素材の枯渇と廃棄物の増加に対応するため、経産省は 2023 年に「資源循環型経済成長戦略」を発表し、循環型経済への産業活動を推進している。同戦略は、リユースやリファービッシュのデザインや品質に関するガイドラインやルールを定め、基準やツールキット、エコシステムを提供する活動を目指している。

資源循環型経済成長戦略のイニシアチブの一環として、サーキュラー・パートナーズと名付けられたパートナーシップ・プログラムが設立され、循環型経済を共に実現するための以下のような産官学協業が進められている[28]。

- 循環型経済を実現するためのビジョンと長期ロードマップ (2030~2050 年) の策定

- 「循環型経済情報流通プラットフォーム」の設立（～2025年）
- 地域レベルで循環型経済を推進する「地域循環モデル」の構築

オープン・サーキュラーエコノミー・プラットフォームは、製品設計と一体化したアップグレード可能な材料循環プロセス、特にプラスチックの循環プロセスを確立するための SIP プロジェクトの一つとして「情報共有プラットフォームに基づく循環経済システム」というプロジェクト名称で検討されている[29]。

循環型経済の実現には、材料が基本的に重要である。より優れた環境性能を持つ新素材を開発するための基礎研究として「SIPにおける産業化のための材料イノベーション・エコシステムの構築」というプロジェクト名称として、産学官共同プロジェクトが組織されている[30]。

そして、以下のような多くの具体的な産業プロジェクトが NEDO の支援で進められている。

- 使用済み電気・電子製品の基礎プロセス技術
- プラスチックの革新的循環プロセス
- アルミニウムの革新的循環プロセス

2.2.5 持続可能な社会に向けた課題

持続可能な社会を実現するためには、人や機械を含む既存の資源を有効に活用することが重要である。一方で、人間は一人ひとり多様な特性や能力を持っているため、社会環境や機械が硬直化して個々の人間の多様性にうまく適応できない場合、人は社会も機械にも上手く受け入れられない課題がある。このような人と機械のミスマッチは、多くの資源の無駄を生み出し、社会の持続可能性とウェルビーイングを低下させる。

日本は長年ロボット技術を発展させ、多くの産業用ロボットが工場や倉庫で単純な繰り返し作業のために活躍している。近年、IT や AI 技術の発展に伴い、ロボットはダイナミックに変化する厳しい環境において、より複雑な作業に使用されるようになった。このような技術の進歩に基づき、Society 5.0 のビジョンのもと、ロボットが社会に組み込まれ、人間と日常的に相互作用できるような未来社会が検討されている。

人間と機械が互いにコミュニケーションを図り、環境に柔軟に適応することで、持続可能な社会を実現するため、現在、産学官連携による研究開発が盛んに行われている。SIP では「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」というプロジェクトで、図 4 に示すようなビジョンを掲げて進めている[31]。

この SIP プロジェクトでは、以下のようなユースケースで、人間と機械が協働するための多様な作業環境を実現するための HCPS(Human-Cyber-Physical Space, 人間・サイバー・物理空間)が研究されている。

- 障害者とその支援者の日常生活支援と福祉活動支援
- 育児を伴う日常的な家事活動

- 作業環境における日常的な身体支援活動
- ビルの保守サービス
- 障害者と子どもの災害時の避難支援

これらのユースケースは、第6章で述べる様々なHMI要件に適合させることができる。そして、産業界をリードする様々な活動が行われ、持続可能な社会に向け、多様な能力を持つ人々を受け入れるための新たな実践的ビジネスを模索している。

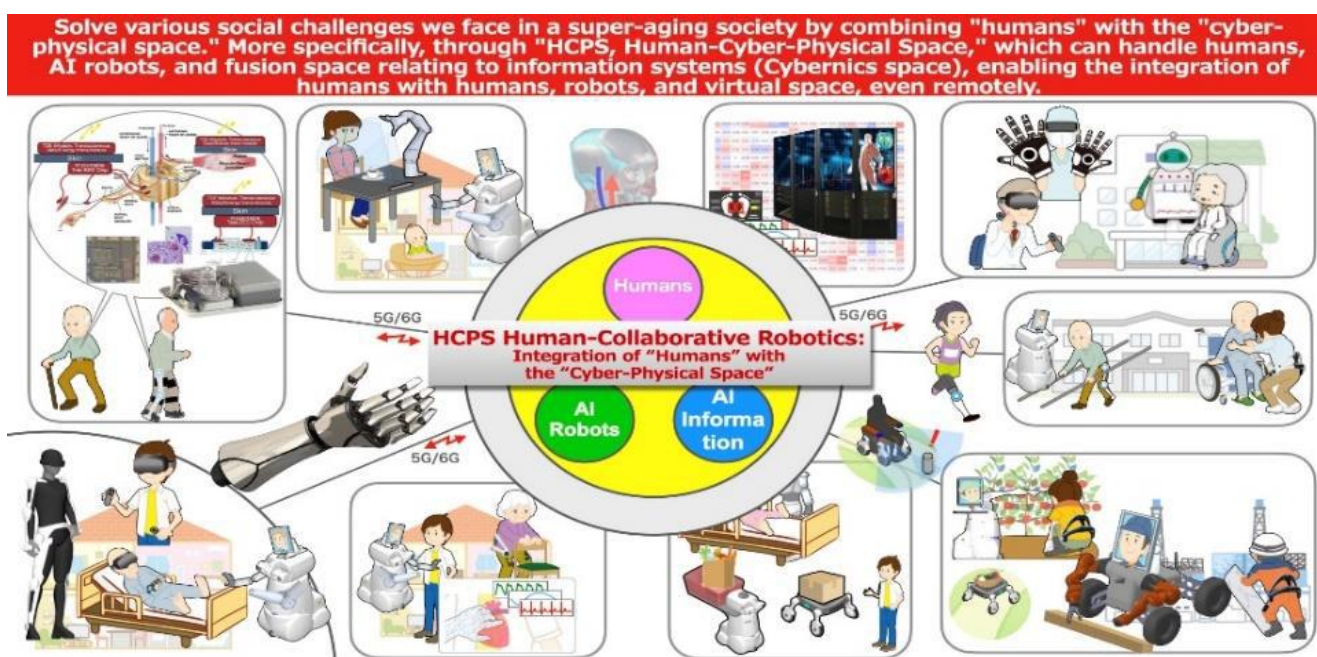


図4 - SIP「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」における、持続可能な社会のための人と機械の共生のイメージ[31]

人の多様性に対する機械の適応性を革新し、総合的な人と機械の共生を実現するために、AI技術や先端ロボット技術の適用が盛んになってきている。テキスト、画像、音声、動画など異なる種類のデータに基づく基盤モデルとディープ・ラーニングにより、人と機械の複雑な活動の自然な相互作用を実現する試みがなされてきている。2025年に経産省の支援により産学が参加するAIロボット協会(AIRoA)が設立され、様々な業界における大量のオープンデータの収集、オープンソースアプローチによる基盤モデルの開発、AIロボットのためのスケーラブルなエコシステムなどの確立が議論されている。活動は始まったばかりだが、この協会に携わった人材を産業や社会に効果的に取り込むことで、産業や社会の持続可能性に貢献することが期待されている。

2.2.6 展望

日本の社会・産業界では、持続可能性の重要性が認識され、国家プロジェクトや産業界での

実証など多くの活動が行われている。しかし、社会・産業界は、持続可能な社会・産業に対する現状の解決策に納得しているとは言い難く、長期的な視点での取り組みが必要な課題も多い。

日本では、持続可能なエネルギー供給が依然として問題となっている。2050年のカーボン・ニュートラルという政府目標では、2040年のCO2排出量を2013年比で73%削減する中間目標が掲げられている。この目標は、再生可能エネルギー50%、原子力エネルギー20%、化石燃料エネルギー30%というエネルギーミックス計画に基づいているものの、現実的な履行には技術的、経済的、社会的にさまざまな問題が残っている。

循環型経済の包括的な社会実装には、社会・経済システムの変化も含めて時間を要するが、循環型経済によってリサイクル／再利用が必要となる枯渇資源は多い。例えば銅は完全なリサイクルを必要とする喫緊の資源であり、世界では銅鉱石の生産量は増加しないと予測があるものの銅の使用量は2050年には約2倍に増加すると予測されている。

更に日本では総人口の減少により人材不足が深刻な問題となっている。2070年には生産年齢人口（15～64歳）が現在の約半分になると推計され、労働環境の変化とともに、持続可能な社会・産業にとって深刻な問題となっている。

本書で取り上げるように、産業の持続可能性に向けて様々な解決策が検討されており、長期的視野に立った取り組みを継続することが不可欠である。日本では、技術的な解決策だけでなく、社会的・経済的なインセンティブを伴う解決策を模索することが重要であると考えており、この視点で、日本、米国、欧州が協力し合う興味深いテーマが考えられる。

【コラム】 DXによる地域活性化

DXによる生産性向上や地域活性化を実現するためには、新技術の開発・活用だけでなく、それを理解し活用するユーザーの能力育成が重要である。これには、技術活用のための教育や投資支援などの取り組みが含まれる。こうした取り組みは、技術ベンダーだけでなく、自治体や銀行なども巻き込んだエコシステムとして運営されている。

例えば、茨城県日立市の大みか地区では、グリーン産業都市の構築を目指し、技術革新を通じて中小企業を含む地域産業の脱炭素化を図る取り組みが

進められている[32][33]。ここでは、DXに関係する技術の紹介や実証を支援するだけでなく、地場産業を支える中小企業が活動するために地元金融機関との連携や市民の視点からの利便性評価など多くのステークホルダーがDXによる地域振興に参加している。

こういった取組みの事例の共有と利活用を、文化的背景や経済情勢、規制や標準の違いを乗り越えて、地域から国、国から世界に広めていくための国際協業の在り方が求められている。

2.3 米国の活動

2.3.1 2025 年以前：立法主導型、気候中心モデル

米国における産業の持続可能性に関する考え方は変革期にある。2025 年以前は、脱炭素化が産業の持続可能性の中心に置かれるという見方が主流だった。立法議題や連邦政策の枠組みもこの点を反映し、クリーン・エネルギーの導入、研究資金、インフラ投資を拡大する法律が次々と制定された。

産業の持続可能性の文脈（2025 年以前）

2025 年以前、米国は経済成長と長期的な環境責任、そして社会的公平性の両立を目指し、産業の持続可能性が国家の重要な優先事項として浮上した。製造業、エネルギー生産、資源採掘を含む産業部門は、米国経済の礎であり、雇用と GDP の両方に大きく貢献していた。しかし同時に、環境問題の大きな原因でもあった。

米国環境保護庁（EPA）によると、このセクターは直接排出と電力消費に関連する排出の両方を含め、GHG の総排出量の約 30% を占めている[34]。2022 年時点で、最終使用エネルギー全体の約 35%、国全体のエネルギー使用量の約 3 分の 1 を消費している[35]。廃棄物の発生はこれらの課題をさらに複雑にしている。2018 年に EPA は 3,570 万トンのプラスチック廃棄物を報告した[36]が、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）は 4,400 万トン近くと推定しており、その多くは不適切なリサイクル・インフラのために埋め立てられたり生態系に漏れたりしている[37]。この高いエネルギー集約度、化石燃料への依存、そして廃棄物負担の増大は、よりクリーンで効率的、そして循環型の産業慣行への移行が緊急に必要であることを浮き彫りにしている。

これに対応して、連邦政府と州政府の双方で、産業の脱炭素化、インフラの近代化、そしてクリーン・テクノロジーの促進のための包括的な枠組みを採用し始めた。業界関係者は自ら循環型経済モデルを採用し、持続可能な慣行に投資し、官民パートナーシップを構築することでイノベーションと労働力の育成を加速させた。

2020 年代初頭までに、グリーン・テクノロジーと持続可能性市場は急速に拡大した。2023 年には約 66 億ドル、2030 年までに 4 倍に拡大すると予測され、年平均成長率は 22% を超えている[38]。この成長は、連邦政府のインセンティブだけでなく、EU の炭素国境調整措置（CBAM）などの世界的な市場および政策圧力、そして消費者の嗜好の変化（アメリカ人の約 70% が環境に配慮したブランドを好む）によっても推進された。

このような背景から、産業の持続可能性のための戦略的基盤を提供するための連邦政府の政策枠組みが策定され、2025 年までの期間における国家レベルでの協調的な行動の基盤が整えられた。

産業の持続可能性に関する連邦政策枠組み（2025 年以前）

2025 年以前、連邦政策枠組みは、国の産業の持続可能性へのアプローチを形成する上で中心的な役割を果たした。これらの枠組みは、経済競争力と、温室効果ガス排出量の削減、インフラの近代化、クリーン・テクノロジーにおけるイノベーションの促進という喫緊のニーズ

とのバランスをとるように設計された。連邦政府機関は、以前のエネルギーおよび環境法を基盤として、州政府と連携し、重工業の脱炭素化、循環型経済モデルの推進、国内サプライチェーンの確保のためのロードマップを策定した。重点は、国際的な気候変動対策のコミットメントの達成だけでなく、急速に拡大する世界の持続可能性およびグリーン・テクノロジー市場において、米国をリーダーとして位置付けることにあった。

2005 年のエネルギー政策法は画期的な転換点となり、再生可能エネルギープロジェクト（太陽光、風力、バイオ燃料）への融資保証と税額控除、家電製品および産業システムの効率化プログラム、原子力エネルギーおよび早期の炭素回収実証による炭素削減へのインセンティブを確立した。また、再生可能燃料基準（RFS）を創設し、米国の燃料ミックスにおけるバイオ燃料の使用量増加を義務付けた。2007 年エネルギー独立安全保障法（EISA）などの改正により、これらの目標は強化され、車両の効率基準の設定、RFS の強化、スマートグリッド開発の支援が行われた。これらの法律は、排出量に配慮した産業政策の基盤を早期に築き、エネルギー安全保障と持続可能性を両立させるという考えを推進した。

アメリカ競争法（The America COMPETES Act、2007 年、2010 年再承認）は、研究開発とイノベーション・エコシステムを通じて産業の持続可能性を推進した。この法律は、国立科学財団（NSF）、国立標準技術研究所（NIST）、エネルギー省（DOE）科学局への資金を倍増し、高リスク・高リターンのエネルギー革新を加速するためのエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）を設立した。また、STEM 教育のパイプラインを強化し、クリーン・エネルギーと先進製造業のための人材を育成した。これらの規定により、連邦政府の科学・産業政策は、新興のクリーン技術がもたらす競争上の課題と整合した。

超党派インフラ法（インフラ投資・雇用法、2021 年）は、クリーン産業インフラへの大規模投資の新たな段階を企画した。1.2 兆ドルの予算配分のうち、600 億ドル以上がエネルギーと持続可能性の優先事項に充てられ、具体的には、全国的な EV 充電ネットワークに 75 億ドル、送電網の近代化とレジリエンスに 650 億ドル、重工業の脱炭素化に向けた地域クリーン水素ハブに 80 億ドル、そして二酸化炭素回収・直接空気回収プロジェクトに 120 億ドルが充てられた。また、産業のエネルギー効率化と耐候性化プログラムへの資金提供も含まれており、産業競争力とエネルギー近代化の関連性を強化している。



図 5 - 連邦持続可能性計画[39]

これに密接に関連していたのが、図5に示す連邦持続可能性計画（Federal Sustainability Plan, 2021年）である。この計画は、米国最大のエネルギー消費国である連邦政府が、脱炭素化と産業の持続可能性において模範となるよう、野心的な目標を設定した。この計画では、連邦政府機関に対し、2030年までに100%炭素排出ゼロの電力供給を実現し、2035年までに連邦政府車両の調達を100%ゼロ・エミッション車両に移行し、2050年までにネット・ゼロ・エミッションの運用を達成することを約束した。また、クリーン・スチールやセメントなどの低炭素材料を優先するために、連邦政府のサプライチェーン、建物の効率性、調達基準の改善を義務付けた。連邦政府の購買力を持続可能性目標と整合させることで、クリーン・テクノロジーにおけるイノベーションと市場需要を促進し、産業界に長期的な投資のシグナルを送ることを目指した。

CHIPS and Science 法（2022年）は、主に半導体製造の強化を目的としていたが、その条項には持続可能性が組み込まれていた（図6）。クリーン・エネルギーの利用、水資源の効率化、そして強靱なサプライチェーンの要件を盛り込んだ、国内半導体生産へのインセンティブとして527億ドルが計上された。また、約1,700億ドルの研究開発費が、DoDの研究所の近代化と、AI、量子コンピューティング、先端材料、クリーン・エネルギーなどの新興技術開発を支援した。CHIPS 法は、持続可能性を産業の自立と国家安全保障と結びつけることで、2025年の移行期以前から、持続可能性の方程式の一部としてレジリエンスを位置付けていた。

CHIPS Act Funding Overview



図6 – CHIPS and Science 法(2022年)[41]

これらの中で最も影響力があったのは、図7に示すインフレ抑制法（IRA、2022年）である。これは米国史上最大の気候変動・産業政策パッケージであり、クリーン・エネルギーへの投資額は約3,700億ドルに上る。IRAは、風力、太陽光、地熱、原子力、蓄電池への税額控除の延長・拡充、国内の重要鉱物サプライチェーンに紐づいた消費者向けEVクレジットの提供、CCUSに関するセクション45Q優遇措置の強化、そして低炭素水素の生産クレジットの創設を特徴としている。また、エネルギー集約型産業（鉄鋼、セメント、化学）の脱炭素化、環境正義と労働力育成の強化に向けた直接投資も含まれている。インフレ抑制法は、米国の脱炭素化戦略を支える安定した長期投資期間を確立した。

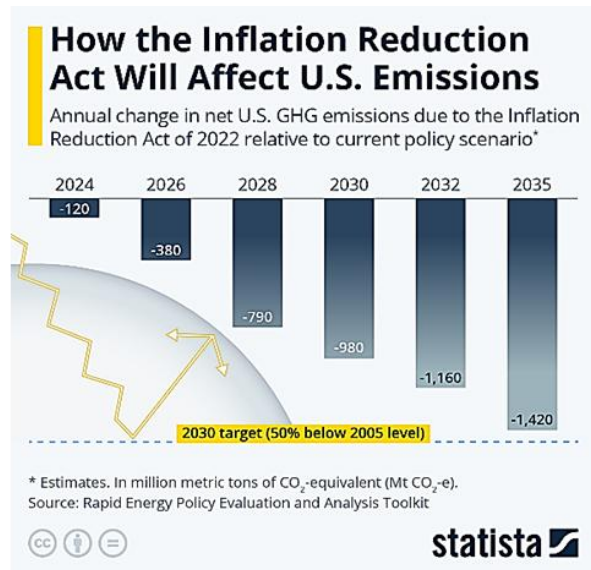


図7 - インフレ抑制法(2022年)[40]

サマリ (2025年以前の米国モデル)

2025年以前の米国産業持続可能性モデルは、立法主導型で気候変動を重視する産業持続可能性モデルと特徴づけられる。このモデルは、排出量の削減とエネルギー転換の加速を目的とした大規模な連邦政府投資、規制枠組み、そしてインセンティブによって支えられており、同時にイノベーションと人材育成の能力構築も図られていた。しかしながら、産業からの排出量の多さ、エネルギー集約度、廃棄物の発生、そして世界的な競争力のプレッシャーといった構造的な課題が、2025年以降、レジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションに基づく再定義されたモデルへの移行のきっかけとなっている。

2.3.2 2025年以降の産業持続可能性戦略

2025年以降、米国は産業の持続可能性の枠組みを意図的に拡大してきた。持続可能性を排出量削減とネット・ゼロ目標のみに限定するのではなく、現在のアプローチは、エネルギー安全保障、経済活力、技術的リーダーシップ、そして世界的なショックへのレジリエンスを包含している。この再構築は、持続可能性は豊かさなしには実現できないという確信に基づいている。エネルギー不足、過剰な規制、あるいは競争力の欠乏に苦しむ製造業は、現実的に雇用、イノベーション、環境保全の進歩を維持することはできない。「エネルギーの削減ではなく、追加」という理念がこの戦略の根底にあり、石油、ガス、原子力、地熱、水力、再生可能エネルギーへの投資拡大を推進することで、国内の安定供給を確保すると同時に、米国の輸出リーダーシップを強化している。

政策は、手頃な価格、国内雇用創出、そして戦略的産業を海外移転圧力から守ることを重視しつつ、技術中立的なアプローチを追求し、二酸化炭素回収、水素、小型モジュール原子炉(SMR)、そしてデジタル化を支援している。気候変動は現実のものであると認識されている

が、持続的な排出量削減と長期的な産業競争力への道筋として、義務化ではなくイノベーションが重視されている。

現政権の政策の詳細は、以下の3つの相互に関連する柱を中心に構成されている。

エネルギー安全保障と豊かさ – この柱は、豊富で信頼性が高く、多様なエネルギー供給が持続可能性の基盤であることを強調している。2023年には、米国のエネルギー生産量は102.83京BTU（British Thermal Unit）に達し、消費量を約9京BTU上回り、米国は純エネルギー輸出国となった。化石燃料は引き続き生産量の約84%を占めているが、再生可能エネルギーと原子力は着実に成長している。現政権の「エネルギーは減らすのではなく増やす」という理念は、エネルギー安全保障は供給を制限することではなく、天然ガス、石油、原子力、地熱、水力、再生可能エネルギーなど、あらゆるエネルギー源を拡大することから生まれることを強調している。豊富なエネルギーは、国内産業を安定させ、送電網の信頼性を高め、排出量の多い海外燃料に代わる液化天然ガス（LNG）や原子力発電技術を輸出する基盤を米国に築く。

経済の活力 – この第二の柱は、産業の持続可能性を経済競争力と雇用創出に直接結び付けている。米国の発電量は2023年に4兆1800億kWhを超え、製造業、デジタルインフラ、そして国家安全保障上の優先事項を支えるために必要な産業生産能力の規模を示している。政策は、鉄鋼、化学、半導体などの産業が国際競争力を維持し、海外移転の圧力に抵抗できるよう確保することを目指している。エネルギー供給における経済性と信頼性の維持は、炭素漏洩を回避し、国内雇用を維持する上で不可欠である。経済の活力は、貿易収支を改善し、世界的な脱炭素化を支援する戦略的なエネルギー輸出によってさらに強化される。その根底にある原則は明確であり、脱炭素化は産業の力を損なうのではなく、長期的な繁栄の基盤を提供しなければならないということだ。

イノベーションへの道 – 第三の柱は、規制優先からイノベーション優先への移行を反映している。米国は特定の技術を義務付けるのではなく、炭素回収、水素、SMR、地熱、再生可能エネルギーがすべて競争できる技術中立的な環境を支持している。エネルギー省は、「世界が羨む」と評される国立研究所の近代化を進め、研究から商業化までのサイクルを加速させている。認可制度の改革によりボトルネックが解消され、民間資本が大規模インフラプロジェクトに流入できるようになる。この「all-of-the-above（あらゆるものを活用する）」R&D戦略により、再生可能エネルギーは市場のシグナルを通じて規模を拡大することが可能になる（2024年には太陽光と風力発電を合わせて米国の電力の17%を供給し、初めて石炭火力発電を上回った）。また、次世代の原子力発電やエネルギー貯蔵ソリューションも推進している。イノベーションはイデオロギー的な選択ではなく、持続可能な成長の原動力として扱われ、技術革新によって競争力と脱炭素化の両方が強化されることが保証されている。

気候変動は依然として現実的かつ差し迫った問題として認識されているが、現在ではより広範な持続可能性アジェンダにおける多くの課題の一つとして捉えられている。米国の電力部門のCO₂排出量は、石炭からガスへの移行と再生可能エネルギーの増加により、2013年以降すでに約30%減少している。現政権は、さらなる削減は、義務化や限定的な規定政策ではなく、イノベーションと多様化によって最も効果的に実現できると主張している。

2025年以降の戦略と長期展望 - 持続可能な産業基盤の構築

2025年以降、米国は産業の持続可能性を豊かさ、競争力、そしてレジリエンスという観点から再定義しようと努めてきた。炭素会計という狭い焦点から脱却し、国家の産業基盤を確保しつつ、地球規模の気候変動目標を推進する、より広範な戦略へと移行させようとしている。この長期的な展望は、持続可能性はエネルギー不足や制限的な義務からは生まれず、エネルギー供給の拡大、技術の近代化、そして経済基盤の強化から生まれるという信念に基づいている。この枠組みの下では、脱炭素化は成長の制約ではなく、技術革新、効率性、そしてエネルギー輸出における世界的なリーダーシップの自然な結果として達成される。

現政権のアプローチは、持続可能性を4つの戦略的側面に整理している。規制緩和によって可能になる自律的なイノベーションは、産業界が規制のペースではなく市場のスピードで適応し、解決策を展開することを可能にする。エネルギー輸出における世界的なリーダーシップは、同盟国に低排出の代替エネルギーや先進的な原子力技術を提供することで、米国が国境を越えて脱炭素化を推進することを可能にする。AIからデジタル・ツイン、スマートグリッドに至るまで、先進技術の統合は、産業システムとエネルギーシステムを、効率を最適化しながら排出量を削減するインテリジェントで適応性の高いネットワークへと変革する。そして、レジリエンスの高いサプライチェーンは、持続可能性を安定の中に定着させ、米国の産業が世界的な混乱に耐え、不確実な地政学的環境においても競争力を維持できるようにする。

これらの要素が相まって、持続可能性は産業成長のトレードオフではなく、その基盤となる、現実的な道筋を描ける。以下では、それぞれの側面が、現在そして将来にわたって持続可能な産業基盤の構築にどのように貢献するか概説する。

規制緩和が実現する自律的なイノベーション

米国モデルの特徴は、イノベーションは柔軟で競争的な環境において最も効果的に発展するという確信にある。現政権は特定の技術を義務付けるのではなく、規制緩和を民間セクターの創造性と投資を促進する触媒と位置付けている。簡素化された許認可制度改革により、エネルギー・産業インフラの立地と承認が加速され、水素ハブ、SMR、地熱施設、二酸化炭素回収プロジェクトの迅速な展開が可能になる。「世界が羨む」と評されるDOEの国立研究所の近代化は、高性能コンピューティング、先進製造のためのテストベッド、クリーン技術のパイロットラインを研究所に装備することで、このイノベーション・エコシステムをさらに強化する。インセンティブは、エネルギー貯蔵の画期的進歩から炭素利用プロセス、先端材料に至るまで、スケーラブルなソリューションを市場に投入できる企業を優遇するように設計されている。この「イノベーション第一主義」のプラグマティズム（実際主義）は、高圧的な規制への依存を減らし、競争を活性化させ、脱炭素化への最も費用対効果が高く影響力のある道筋を見出すことを目指している。

エネルギー輸出を通じたグローバルリーダーシップ

エネルギー輸出は、米国経済の活力の礎であるだけでなく、世界的な脱炭素化の強力な手段とも位置付けられている。米国は、排出量の多い燃料に代わるクリーンな代替燃料を供給することで、国内に追加コストを課すことなく、間接的に海外の排出削減を支援している。

LNG の輸出は、この役割を象徴する好例であり、LNG の輸出量は、2024 年の日量 119 億立方フィートから 2030 年には日量 215 億立方フィートに増加すると予測されており、年間成長率は約 10%となっている（ロイター、2024 年）。DOE によると既に最大 480 億立方フィートの輸出能力をカバーしており、世界市場における米国の影響力の大きさを浮き彫りにしている。また米国では、2050 年までに国内の原子力発電能力を 3 倍に増強する計画（DOE、2024 年）を進めており、LNG に加え原子力エネルギーの輸出も拡大している。これにより、先進的な SMR を含む原子力技術の輸出や、低炭素のベースロード電源を求める同盟国への核燃料供給の機会が生まれている。豊富な化石燃料と先進的な原子力能力を組み合わせることで、米国は独自のエネルギー超大国としての地位を確立し、世界のエネルギー安全保障を強化すると同時に、世界の排出量削減にも貢献することができる。

先進技術の統合

長期的な持続可能性戦略の中核を成すのは、先進的なデジタル技術を産業システムのあらゆる階層に統合することである。AI は、製造工場の予知保全や送電網の運用のリアルタイム最適化に更に活用され、効率向上とダウンタイム削減に貢献している。デジタル・ツイン（産業施設の高精度シミュレーション）は、プロセスの継続的なモデリングを可能にし、プロアクティブな品質管理、予知保全、詳細な排出量モニタリングを可能にする。これらのイノベーションは、廃棄物の削減、生産性の向上、そしてサプライチェーンの混乱時におけるレジリエンス（回復力）の強化に貢献する。システムレベルでは、分散型エネルギー資源、蓄電、需要側管理を統合し、再生可能エネルギーの普及が進む中でも信頼性の高い電力を確保するためにスマートグリッドが導入されている。変動の激しい風力・太陽光発電と安定したベースロード電源のバランスをとることで、スマートグリッドは産業競争力の維持に必要な信頼性を確保する。すなわち、AI、デジタル・ツイン、そしてスマートグリッドが連携することで、産業における生産、エネルギー供給、物流がシームレスに連携する相互接続されたデジタル・エコシステムが形成され、炭素強度を低減しながらレジリエンスを強化する。

レジリエントなサプライチェーンと持続可能性

米国モデルは、レジリエンスそのものを持続可能性の中核的側面と捉え、世界的なショックに対して脆弱な産業システムは長期的な発展を確保できないことを認識している。このため、石油、ガス、重要鉱物の国内生産拡大は、外国からの輸入への依存度を低減し、米国産業を地政学的な価格変動から保護する。鉄鋼、化学、半導体といった戦略セクターは、環境基準の低い地域への生産移転によって発生する「炭素漏出」を防ぐため、オフショアリング圧力から保護されている。港湾、パイプライン、輸送網といったインフラの多様化への投資は、冗長性を生み出し、世界貿易のボトルネックに対する脆弱性を低減する。同時に、LNG、原子力、先端技術分野における同盟国との連携強化は、サプライチェーン全体のリスクを分散し、レジリエンスを高める協力ネットワークを構築する。米国は、サプライチェーンの安定性を持続可能性と不可分なものとして捉えることで、レジリエンスを産業力と競争力のより広範なモデルに組み込んでいる。

これらの戦略は、持続可能性を、豊かさ、競争力、そしてレジリエンスとして実践的に再定

義することを体現しており、気候変動緩和だけでなく、将来の産業・エネルギーシステムの形成においても米国を主導する立場に据えている。

2025 年以降のモデルにおける官民協働パートナーシップ

米国産業の持続可能性に関する長期展望は、レジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションは政府の政策だけでは達成できないことを強調している。これらの目標達成には、連邦政府機関、産業界のリーダー、そして学術機関を結びつけ、イノベーションと実装の両方を拡大する協働の枠組みにかかっている。2025 年以降のモデルでは、官民パートナーシップ（public-private partnerships, PPPs）が産業変革の運営基盤として機能する。官民パートナーシップは、連邦政府資金を動員して先進技術のリスクを軽減し、産業投資を商業化へと導き、学術的専門知識を活用して未来の労働力を育成する。このモデルを通じて、官民パートナーシップはクリーン・エネルギーとデジタル技術の導入を加速し、レジリエントなサプライチェーンを大企業だけでなく中小企業にも拡大し、持続可能性への移行への包摂的な参加を促進する。このアプローチを体現する旗印となる 2 つのプラットフォーム、Manufacturing USA と Manufacturing Extension Partnership (MEP) は、スマートマニュファクチャリング、水素、循環型経済ソリューションなどの最先端技術を推進し、MEP はこれらのイノベーションがより広範な産業基盤に浸透することを保証する。これらは、2025 年以降の時代における協力的なパートナーシップが、イノベーションと産業のレジリエンス、そして広範囲にわたる持続可能性への影響を結び付けながら、国家戦略をどのように実行に移すかを示している。

Manufacturing USA : イノベーションと競争力の推進

17 の技術専門機関を擁する Manufacturing USA ネットワークは、応用研究、商業化、そして人材育成のための国家レベルのテストベッドとして機能している。2025 年以降のパラダイムにおいて、このネットワークは 4 つの主要な役割を果たしている。第一に、サプライチェーンの脆弱性に対処することでレジリエンスを構築している。CESMII（スマートマニュファクチャリング）や REMADE（リサイクルとリマニュファクチャリング）といった機関は、デジタル化、循環型マテリアルフロー、そして輸入依存度を低減し、世界的なショックへのリスクを軽減する予測能力を実現する。第二に、アデティブ・マニュファクチャリングやフォトニクス、バイオフィブレーションに至るまで、最先端技術を進歩させることで豊かさを実現し、生産経路の多様性を拡大している。これは「エネルギーを減算するのではなく、足し算する」という理念に直結しており、産業の選択肢を狭めるのではなく、広げるものである。第三に、研究と商業化の交差点におけるイノベーションを促進している。これらの機関は、先端技術のリスクを軽減することで、民間資本によるソリューションのスケールアップを容易にしている。CESMII のデジタル統合への取り組みは、持続可能性の中核的な推進力としてデジタル変革を重視する政権の姿勢を反映する好例であり、ロボット工学、AI、再生可能エネルギー、先進製造といった分野における次世代人材のパイプラインを整備することで労働力の能力強化を図り、将来を見据えた労働力によって米国の競争力が支えられることを保証している。

MEP：中小企業におけるイノベーションの拡大

Manufacturing USA が最先端技術の開拓を進める一方で、NIST MEP プログラムは、米国の製造業の 90%以上を占める中小企業の広大なネットワークにイノベーションが確実に行き渡るよう支援している。2025 年以降のモデルにおいて、MEP は、より広範な産業エコシステム全体に、レジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションを根付かせることで、補完的な役割を果たす。そして、中小企業にデジタルツールと持続可能な慣行を提供することでレジリエンスを拡大し、中小企業が取り残された場合に生じるであろうシステム的な脆弱性を防止する。MEP は、中小企業に技術統合、リーン生産方式、サプライチェーン最適化へのアクセスを提供することで、持続可能性を主要企業に限定せず、経済全体に浸透させることで、豊かさを拡大する。また、イノベーションの普及を加速させ、スマート製造プラットフォーム、積層プロセス、循環型経済の実践など、Manufacturing USA の研究所で開拓された技術を中小企業が導入できるよう支援することで、連邦政府資金による研究開発と日常的な製造業の実践との間のギャップを埋めている。同様に重要なのは、MEP が人材育成とインクルージョンに投資し、過小評価されているグループの STEM および製造業へのキャリア参加を拡大していることである。これは、エネルギー安全保障に加えて、経済活力と社会的公平性を重視する、ポスト 2025 モデルにおける持続可能性のより広範な定義と一致している。

米国モデルを定義する相乗効果

Manufacturing USA と MEP は協力して米国の持続可能性戦略を運用する二層構造のシステムを構築している。Manufacturing USA はフロントエンドのイノベーションを推進し、技術とレジリエンスの限界を押し広げる。一方、MEP はバックエンドの普及を確実なものにし、これらのイノベーションを中小企業に浸透させ、産業エコシステムを根本から強化する。この意味で、官民連携は米国のアプローチにおいて、周辺的なものではなく、中心的な役割を果たしている。これらの連携は、レジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションを、抽象的な政策原則から、工場の現場、サプライチェーン、そして全国のエネルギーシステムにもたらされる具体的な成果へと転換している。この二重の枠組みは、米国特有の産業変革モデルを反映しており、それは、現政権が実現条件を設定し、セクター間の緊密な連携によって成果を生み出すというモデルとなっている。米国は、技術革新と幅広い導入を組み合わせることで、産業の持続可能性の追求を通じて競争力を強化し、世界的なショックに対するレジリエンスを構築し、世界のエネルギー・産業経済における長期的なリーダーシップを確保している。

2.3.3 サマリー：米国の産業持続可能性戦略

2025 年以前の米国産業の持続可能性モデルは、IRA、CHIPS、連邦持続可能性計画に代表される法律、連邦政府のインセンティブ、そして脱炭素化アジェンダによって推進されていた。2025 年以降のモデルは、持続可能性をレジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションとして捉えるという実用的な再定義を示している。

2025 年以降のモデルにおいて、米国はレジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションを中心とした実際的なモデルを通じて、産業の持続可能性を再定義した。この戦略は、気候のみに

焦点を当てるのではなく、エネルギー安全保障、経済活力、そして技術的リーダーシップを中核的な優先事項として統合している。このモデルにおいて、米国は「エネルギーの削減ではなく、追加」を重視し、石油、ガス、原子力、地熱、そして再生可能エネルギーを拡大することで、手頃な価格と送電網の信頼性を確保し、同時に世界のエネルギーリーダーシップを強化する。産業のレジリエンスはそれ自体が持続可能性として扱われ、規制の合理化、基準の近代化、そして戦略的産業の海外移転からの保護といった政策が展開される。この再定義により、米国は排出量を削減するだけでなく、産業基盤を確保し、国際競争力を拡大し、世界中で持続可能性の移行を形成する立場に立つことになる。

2.4 欧州の活動



図 8 - インダストリー4.0 の 2030 年ビジョン [42]

インダストリー4.0 は、工業生産におけるイノベーションと変革の基本的なプロセスである。この変革は、硬直的で厳密に定義されたバリューチェーンが、新たな協力関係に基づいた、柔軟で高度、ダイナミックかつグローバルに繋がるバリュー・ネットワークに置き換えられるなど、グローバルなデジタル・エコシステムにおける新たな経済活動と業務によって推進される。また、データ駆動型のビジネスモデルは、産業の価値創造のパラダイムとして製品中心

主義に取って代わり、顧客とソリューションへの利点を最優先に考える。これにおいて、データの可用性、透明性、そしてアクセスは、“つながる経済”における成功の鍵となる要素であり、競争力を大きく左右する。

PI4.0 の関係者は、デジタル・エコシステムの構築に対する総合的なアプローチを 2030 年のビジョンとして提示している（図 8）。このビジョンでは、ドイツおよび欧州の産業基盤の固有の状況と確立された強みを基に、オープン・エコシステム、多様性、多元性を重視して、社会的な市場経済の要件に沿った将来のデータ経済のフレームワークの確立を目指しており、これにより市場の全ての関係者間の競争を支援しようとしている。このビジョンは、主にドイツと欧州の産業と商業を対象としているが、オープンであること、および世界中のパートナーと協力する重要性を強調している。ドイツと欧州の産業の強みは、異質性、多様性、専門化によって推進されるイノベーションと商業のシステムに根ざしており、商業の自由、データと情報のセキュリティ、個人の権利の保護と相まって、欧州の産業や社会の中心柱となっている。この構造の上に、オープンで柔軟なエコシステムの分散型システムを構築し、自由で社会的な市場経済の一連の価値観の中でデジタル経済を形成するための最良の条件を提供しようとしている。

インダストリー4.0 を成功させるには、自律性、相互運用性、持続可能性という 3 つの密接に関連した戦略的行動が不可欠である。ドイツ研究会議インダストリー4.0（Forschungsbeirat Industrie 4.0）は、将来の研究テーマの探索およびインスピレーションの源泉としての役割を果たしており、2030 年ビジョンの実現に貢献する研究開発ニーズを特定し、研究テーマの設計を行った[43]。その過程で、産業における価値創造の変化、技術開発の見通し、インダストリー4.0 に関わるソリューションのエンジニアリング、仕事と企業と社会の相互作用など、関係する主な課題が定義された。

PI4.0 の関係者は、ドイツ、欧州、そして世界でインダストリー4.0 のスケールアップのために、今後 10 年これらの活動分野に共同で取り組む。産業界のすべての関係者との対話を通じて、世界的に優れた産業界の地位を基盤として持続可能な形で DX を実現し、繁栄する欧州の中堅企業全体にインダストリー4.0 を定着させるための行動の枠組みを構築していく。この原動力を効率的かつ競争力のあるものにするためには、新技術への対応だけでなく、戦略的に重要かつ差別化された分野において国際的なリーダーとなることが不可欠である。そのためには、ドイツのイノベーション・システムを、より機敏で学際的、適応性の高いものにするための具体的な対策を講じると共に、長期的な視野を常に維持する必要がある[44][45][46]。特に、革新的で柔軟なエコシステムを創出する新たな場を作り出し、技術と知識を発展させるためのダイナミックな要件を有する新しい協業スキームを確立することが重要である。

2.4.1 自律性

自律性の原則は、個々のビジネスモデルの定義と形成からインダストリー4.0 のエコシステム内での購入の決定に至るまで、市場におけるすべてのステークホルダー（企業、従業員、科学者、個人）が、自己決定的で独立した意思決定を行い、公正な競争に参加する自由を支えている。システムズエンジニアリングなどのアプローチは、特に自律的に変更可能なインダストリー4.0 のシステムのエンジニアリングのために、ますます重要になっている。この具体的

な例として、柔軟性とネットワーク化を特徴とするサイバー・フィジカル・マトリックス生産システムがあり、その実装に新たな可能性をもたらす[47][48]。

2.4.2 相互運用性

多様なステークホルダーを柔軟にネットワーク化し、俊敏なバリュー・ネットワークを形成することは、インダストリー4.0におけるデジタル・ビジネス・プロセスの中核の一つである。このような複雑で分散的な組織構造を形成する上で、すべてのステークホルダーの相互運用性は重要な戦略的要素となる。企業や産業分野をまたいで業務やプロセスを直接ネットワーク化するためには、すべてのパートナーが平等に参加し貢献する高度な相互運用性が不可欠であり、この相互運用可能な構造とインターフェースは、製造業と顧客の両方に、デジタル・バリュー・ネットワークへの無制限の参加を可能にし、新たなビジネスモデルを構築する機会を提供し、自律性も高める。相互運用性の重要な礎となるのは、オープンで、主権を持ち、法的に安全なデータアクセスを可能にするデータスペースの構築と実装である[49]。このデータスペースは、システムとプレーヤーの効率的なネットワーク化の基盤となり、企業や産業分野の境界を越えた情報交換を促進するために不可欠である。これには、関係者の信頼を確保してインダストリー4.0のコンテキストでデータを持続的に使用するための基盤を構築するために、データのセキュリティと保護を保証する仕組みの確立が必要となる。

2.4.3 持続可能性

経済、環境、そして社会の持続可能性は、我々の社会の価値観の根幹をなすものである。持続可能性はインダストリー4.0に組み込まれつつあり、インダストリー4.0は持続可能性の大幅な進歩を可能にする。例えば、一人ひとりの繁栄と生活の質は、前向きで競争力のある産業分野に大きく依存している。イノベーションのエコシステムとインダストリー4.0の実現は、インダストリー4.0が持続可能性をもたらし、インダストリー4.0自体が持続可能となる豊かな環境を作り出し、ひいては私たちの社会の生活水準の維持に重要な貢献を果たすことになる[50]。

2.4.4 人間に焦点を当てること

新しいHMIは、産業界においてますます重要になっている。こうした相互作用は、人が機械や自動化システムと協働する方法を変えつつある[51][52][53][54]。人間が機械を制御する従来の純粹に機能的なインターフェースに代わり、人間と機械が共生関係を築く協調的なアプローチが追求されている。そこでは機械は反復的で精密な作業を担い、人間はより複雑で創造的かつ戦略的な意思決定を行う。

新しいHMIを導入するためには、透明性のあるコミュニケーションと、従業員を変革プロセスに早期に関与させることが必要である。研修と継続的な教育は新しい技術の活用を促進し、人間工学に基づいたユーザーフレンドリーなインターフェースと人による制御は信頼を促進する。また、技術が単調な作業や危険な作業を代替し、従業員の生活の質を向上させることで、労働環境を改善することも重要な視点である。そして、従業員からのフィードバックに

基づく反復的なプロセスにより、効率性と従業員の幸福の両方を促進する調整が確実に行われる。

このビジョンを実現するために、M-X 活動が開始された。



図 9 - IM-X 協議会 [55]

ここ数年、「-X」のつくイニシアチブの数が増えている。Factory-X は、Manufacturing-X イニシアチブの先駆的プロジェクトである。Manufacturing-X イニシアチブ、Catena-X、Factory-X などのプロジェクトは、ネットワーク化された柔軟で持続可能な生産の世界を実現し、製造業の DX を推進するための重要なコンセプトである。現在では、Catena-X や Factory-X プロジェクトのように産業バリューチェーン全体にわたる多国間データ共有を支援するデータスペースに焦点が移っている。欧州では、エネルギー、製造、ヘルスケアなどの産業分野に焦点を当て、現在 14 の欧州共通データスペースを構築している。

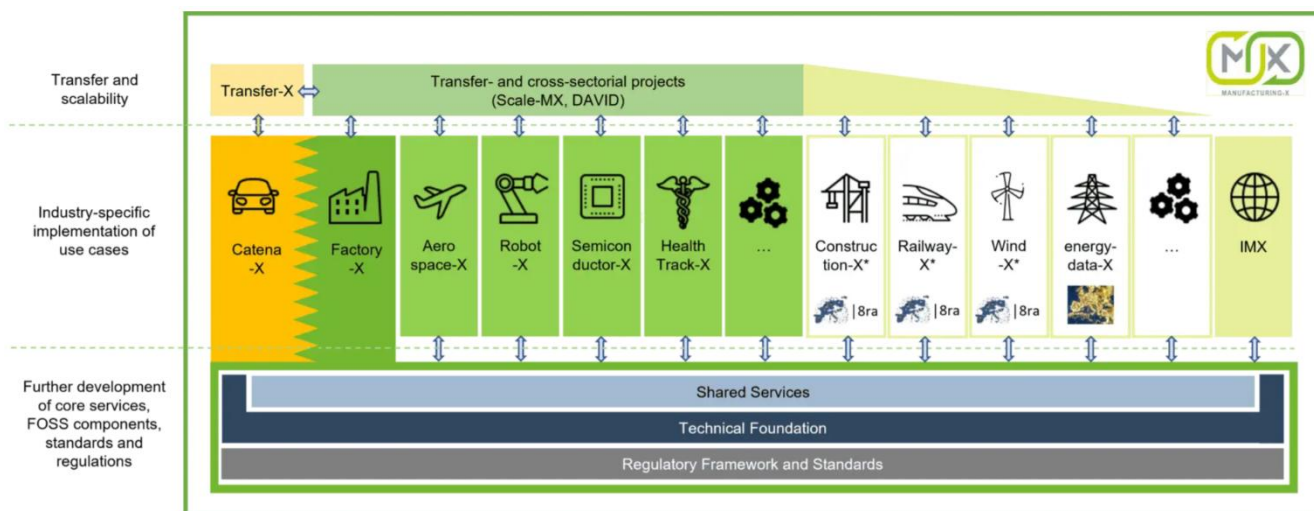


図 10 - Manufacturing-X におけるプロジェクト間の協力関係 [56]

Manufacturing-X イニシアチブには、工作機械製造 (Factory-X)、半導体、自動車 (Catena-X)、航空宇宙、プロセス産業など、様々な業界に特化したプロジェクトが含まれ、異なる企業間の生産プロセスをネットワーク化し、完全に統合されたバリューチェーンを構築しようとしている。IoT、AI、エッジ/クラウド・コンピューティングなどの技術を活用してリアルタイムにデータを収集、分析、活用し、生産の最適化とコスト削減を目指している。Manufacturing-X は、サプライヤー、メーカー、顧客の間の緊密な連携を可能にし、イノベーション力と競争力を高め、生産効率の向上だけでなく、変化する市場環境への適応力も向上することを目的としている。Factory-X のビジョンは、図 10 に示すように自律的で自己最適化された工場であり、労働者と機械がシームレスに協働することを目指している。これに関して、欧州でも AI を活用したロボットの研究開発が進んでいる (付録 A)。

2.4.5 ユースケース

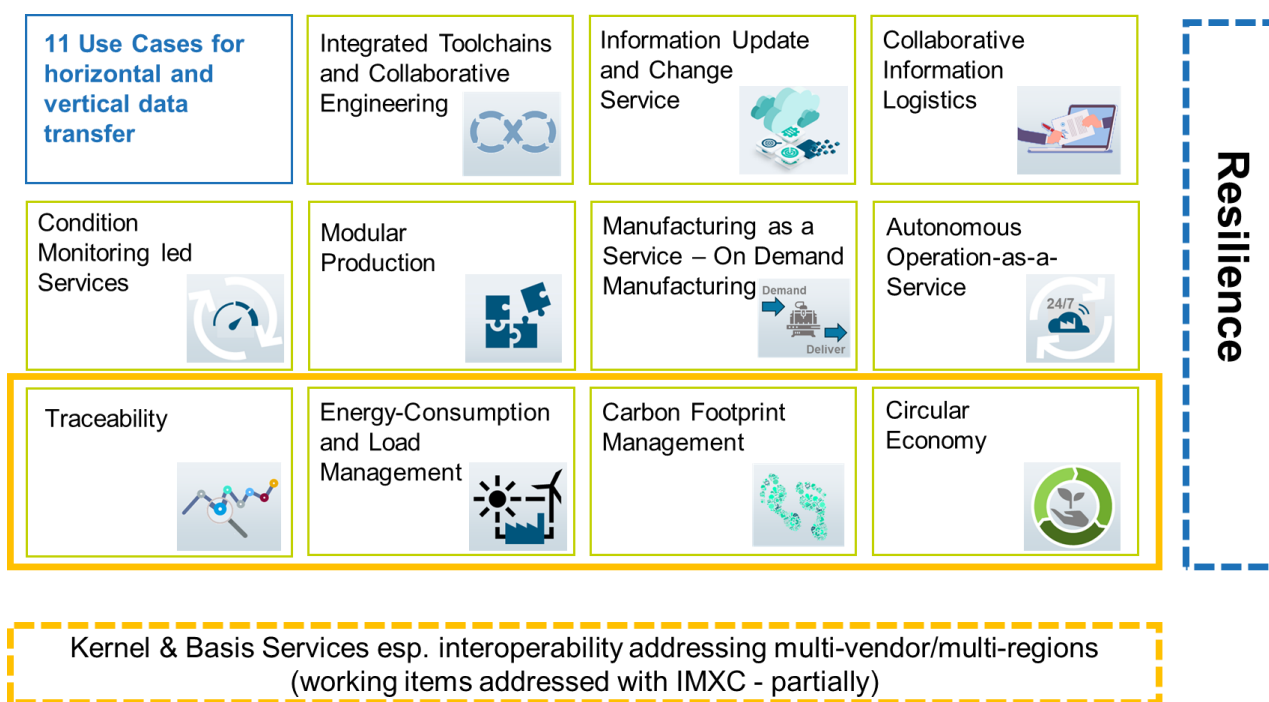


図 11 - 共通カーネルと基本サービスに基づく Factory-X の 11 のユースケース [56]

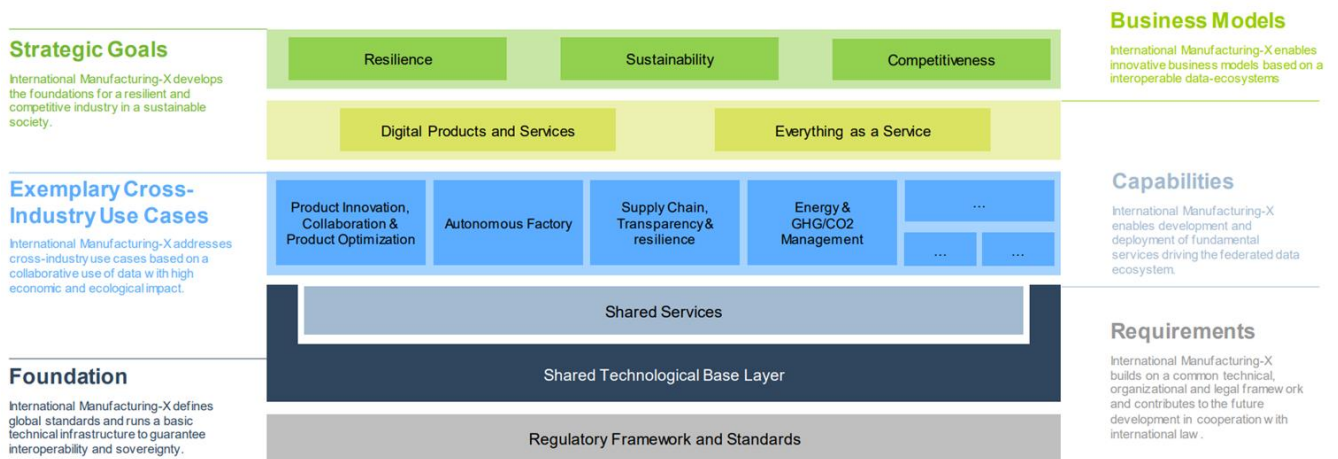


図 12 - 活動と国際のステークホルダーのための基礎的枠組みエラー! 参照元が見つかりません。

2.4.6 IM-X でのグローバル協業ネットワーク

製造業をリードする国や企業との協力が確立されつつある IM-X 協議会を通じて、Manufacturing-X はグローバルな展開を図っている。世界中の主要なイニシアチブが、互換性のある産業データ・エコシステムの世界的なネットワークを確立するために、定期的な交流を行っている。今後、さらに多くのイニシアチブや国が参加する予定である。



図 13 - IM-X のグローバルネットワーク [58]

2.5 地域間の類似点と相違点

本章では、産業界の持続可能性に関する日米欧の取り組みを見てきた。

日本では SIP プログラム、米国ではマニュファクチャリング USA、欧州ではインダストリー 4.0 関連プログラムなど、各国とも産学官が一体となって経済成長を牽引するためのデジタル化施策に取り組んでいることがわかった。

さらに、経済成長に伴う環境負荷の面では、日本では 3R（リデュース、リユース、リサイクル）をコンセプトとした情報共有プラットフォームの構築、米国ではリサイクル・再製造技術を推進する REMADE 研究所などのプログラムを通じた科学的取り組み、欧州では廃棄物や資源の消費を最小限に抑えるための持続可能性戦略に循環型経済の実践を組み込んだ規制枠組みの構築など、各地域で循環型経済の実現に向けた取り組みが進められている。

また、持続可能な産業成長の基盤であるエネルギー供給についても、各地域が二酸化炭素排出量の削減やエネルギー安全保障の強化に取り組んでいる。

このように、問題意識や産学官が一体となって取り組む姿勢は各地域に共通しているものの、それぞれの経済状況に応じた優先課題やアプローチが異なることがわかった。

日本の Society 5.0 ビジョンは、テクノロジーと社会福祉を独自に融合させたサイバー・フィジカル空間を提唱し、**経済発展と社会的課題の解決との調和**を目指している。米国は変革期にあり、「**イノベーション第一主義**」の**プラグマティズム（実際主義）**に移行し、高圧的な規制への依存を減らし、競争を活性化させ、気候目標とエネルギー安全保障、経済活力、技術的リーダーシップのバランスをとろうとしている。多くの国を含み、さまざまな経済状況を持つ欧州では、**規制の枠組みや政策主導の持続可能性に重点**を置くことが多く、包括的な政

策や規制を通じて、製造業を環境や社会の目標に合致させることを重視している。

資源制約という点でも地域差が見られた。日本では、天然資源に限りがあり、輸入に大きく依存しているため、**持続可能性を高めるためのエネルギー効率と材料のイノベーション**に重点が置かれている。米国では、持続可能性の目標を達成するために、**イノベーションと先端技術を通じた資源利用の最適化と効率性の向上**に重点が置かれている。欧州では、各国が異なる資源制約に直面しており、**資源効率と持続可能性に向けた戦略も多様化**している。

以上のように、各地域が共通の問題意識を持ち、産学官が連携して産業の持続可能性に取り組もうとする姿勢は見られるが、具体的な施策の優先順位やアプローチについては、地域の経済状況等を考慮し、地域ごとに独自のものがあることがわかった。このような共通点と相違点を相互に理解し、地球規模での産業の持続可能性の実現に向けた国際協力を推進することが重要である。次章以降では、関連する話題をさらに掘り下げ、国際協力の可能性を探っていく。

【コラム】 ニーズに合わせた DX による中小企業のエンパワーメント

中小企業は社会と経済において重要な役割を担っており、その DX は国家全体の競争力を高める可能性を秘めている。しかし、中小企業がデジタルを活用して生産性を向上させるには、まだまだ課題がある。

中小企業が直面する具体的な課題のひとつは、取引先ごとに異なる条件や文書形式に対応するために必要な労力である[59]。従来、産官学が一体となった取り組みでは、大企業向けの DX ソリューションの活用が推奨されてきたが、中小企業の視点やデジタル活用能力に合わせたソリューションが必要

である。つまり、中小企業はデジタル・ソリューションを自社でゼロから開発するのではなく、自社のニーズや予算に合わせたカスタマイズ・ソリューションを求めている。そのためには、中小企業がデジタル・ソリューションをカスタマイズしやすいように、一例としてノーコードでカスタマイズできる環境が求められている。

このように、社会の DX の中核を担う中小企業や市民のマインド、資金力、対応力などを現実的に見極め、中小企業の目線で変革を進めていくことが重要である。

3 労働生産性、貿易の開放性、インセンティブ、労働の流動性

3.1 はじめに

3.1.1 世界の生産性の長期トレンド

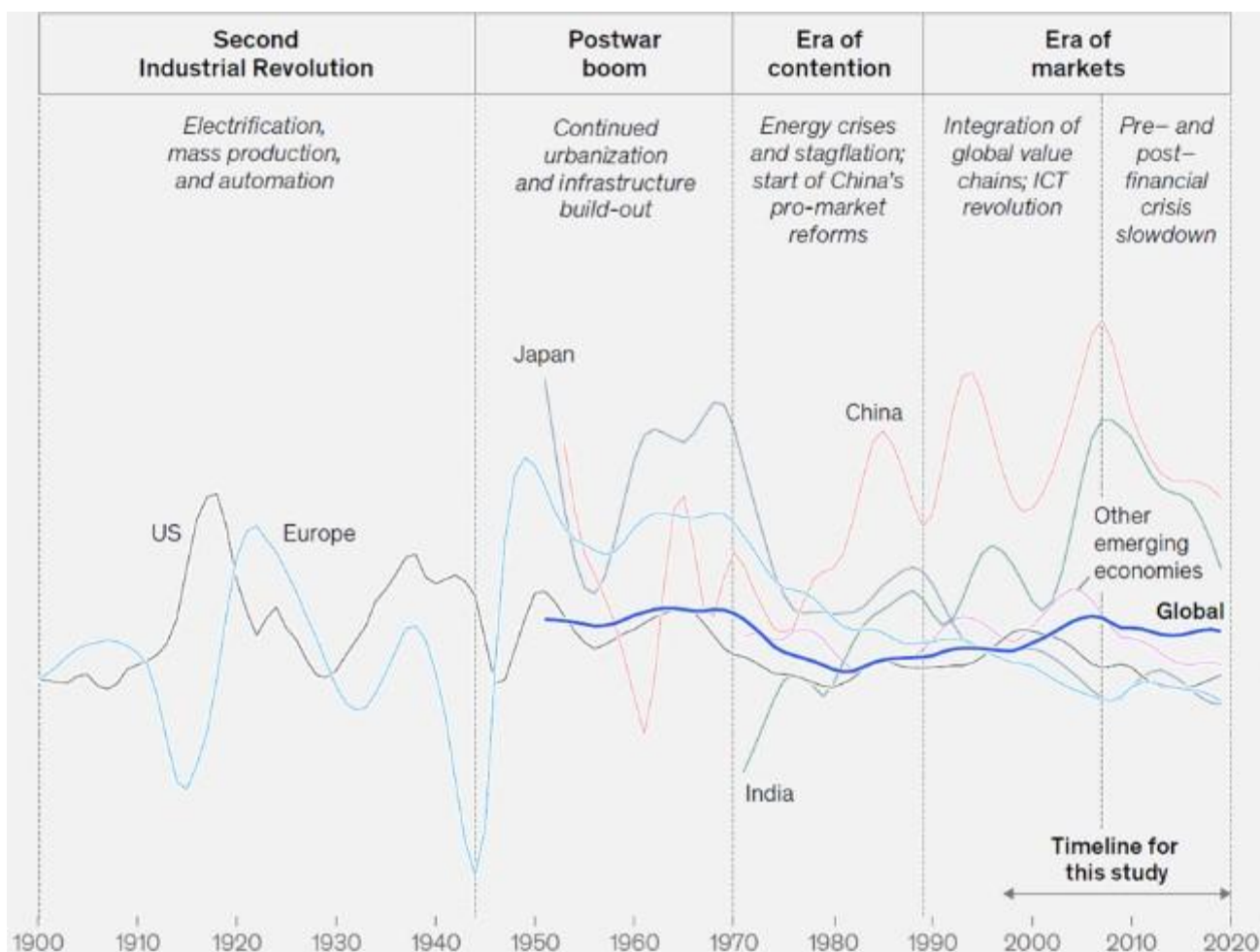
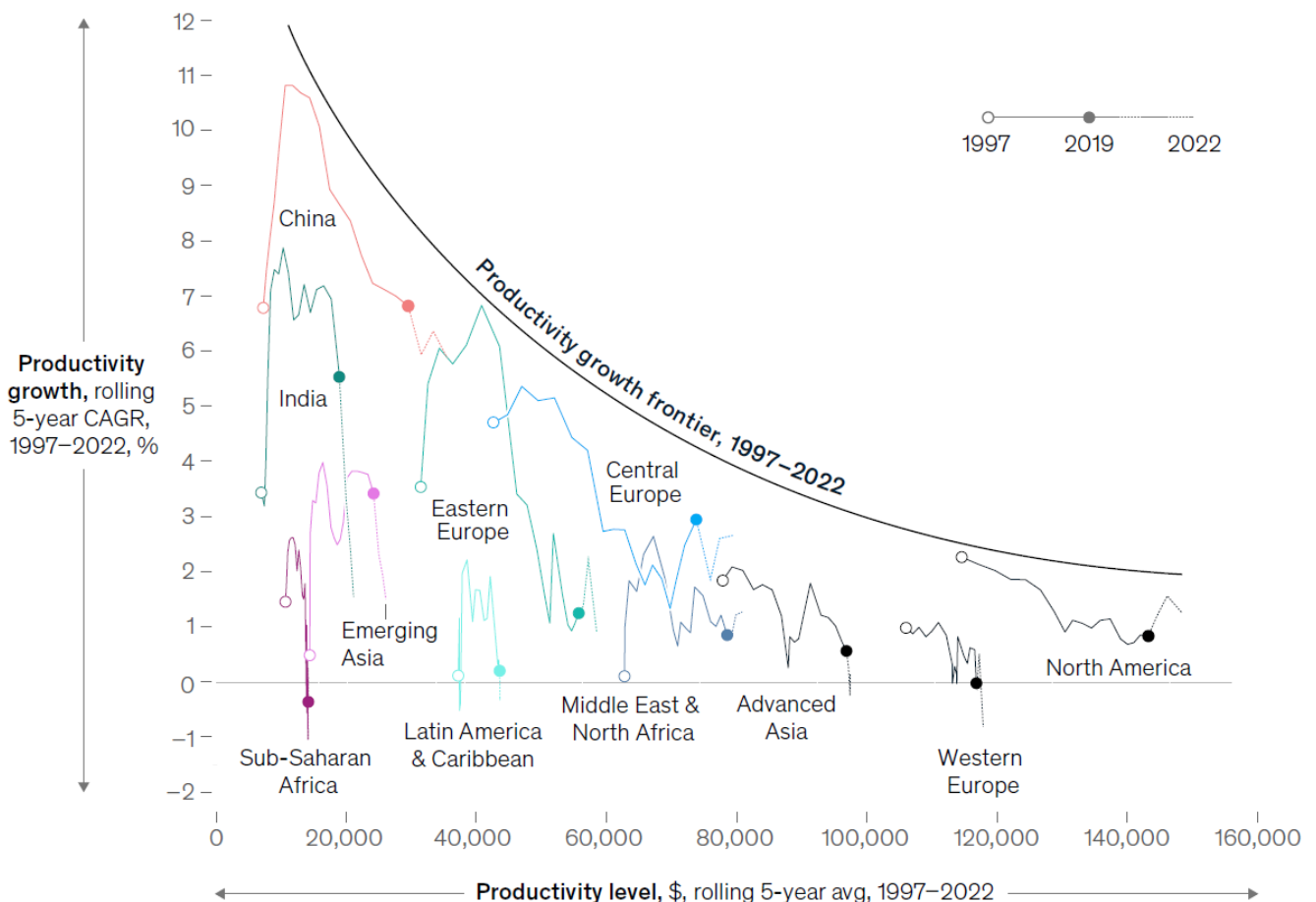


図 14 - 労働生産性の成長率トレンド（経済全体、前年比%） [6]

変化する世界経済の課題に直面する中、労働生産性の複雑さとその要因を理解することは、持続的な成長と競争力にとって極めて重要である。本章では、日本、米国、欧州における労働生産性の動向を包括的に分析し、各地域特有のダイナミクスを洞察する。労働生産性には2つの主要な要因があると言われる[6]。1つは労働者一人当たりの資本量であり、その増加は資本依存とも呼ばれる。資本には、機械、電気、ガス、水道、道路などの有形資産と、ソフトウェアや知的財産などの無形資産があり、オフィスワーカーはノートパソコンを持っていると生産性が高く、建設作業員はクレーンを持っていると生産性が高く、運輸作業員は道路が整備されていると生産性が高くなると一般的に言われている。2つ目は人的資本であり、労働者

の能力、教育、蓄積された経験などが相当する。例えば、ノートパソコンを使用するオフィスワーカーは、能力、教育、蓄積された経験があれば生産性が高くなると言われている。すなわち、労働生産性の議論において重要なポイントは、資本依存度と人的資本の成長をいかに促進するかということである。

生産性の向上は、新技術の社会的応用や人間社会のインフラ整備を通じて世界中に広がってきた[6]。日本では、製造業における労働生産性の重要性から、優秀な人材を引きつけ、維持するための戦略的インセンティブの必要性が浮き彫りになっている。米国では、技術革新と労働力のダイナミクスが生産性を形成しているが、欧州では各国それぞれの生産性の状況にあり、ターゲットを絞った支援と投資が必要となっている。図 14 および図 15 に示すように、歴史のみると、第一次世界大戦の前後に技術革新と生産性の主導権は欧州から米国に移り、電化、大量生産、自動化などが推進された。その後の世界恐慌や第一次世界大戦および第二次世界大戦終戦時の不況にもかかわらず、米国は 1910 年から 1970 年代にかけて平均 3% の生産性上昇率を維持することができた[6]。第二次世界大戦後、欧州と日本は生産性の大幅な向上を経験し、投資によって都市が再建され、技術への投資によって米国に追いつこうとした。中国は 1978 年の経済開放以降、生産性の伸びを加速させたが、2000 年代後半にピークを迎えた。インドなど他のアジア主要国も、グローバル・バリュー・チェーンへの統合に伴い、過去 25 年間で生産性が上昇している[6]。



Note: N=242, weighted averages for 11 regions in 21 rolling 5-year periods.

図 15 - 1 人当たりの生産性水準と生産性の伸び[6]

3.1.2 貿易の開放性

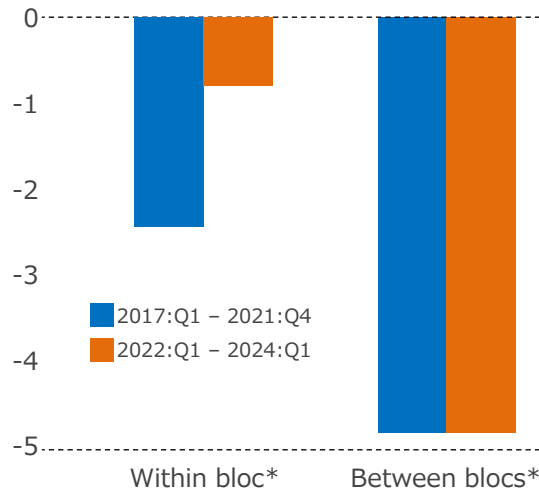


図 16 - ウクライナ開戦前後の貿易成長率[8]

ブロックの定義は、オーストラリア、カナダ、欧州、ニュージーランド、アメリカからなる仮想ブロックと、中国、ロシア、そして 2022 年 3 月 2 日のウクライナ戦争に関する国連総会での採決でロシアに味方した国々を含む仮想ブロックに基づいている。その他の国々は非同盟諸国とみなされる[8]。

図 16 は、IMF が分析したウクライナ開戦前後の貿易成長率のポイント差を示している[8]。IMF によると、地政学的な分断が進んでいることは世界が低成長経済へと向かう一因になっていることを示している。また 2023 年には約 3,000 の貿易制限措置が導入された、これは 2019 年のほぼ 3 倍である。IMF は、グローバル市場の統合が進みバリューチェーンが複雑になるにつれて、貿易制限措置が地域分業による効率の向上を阻害し、地政学的分断のコストが増大すると報告している。

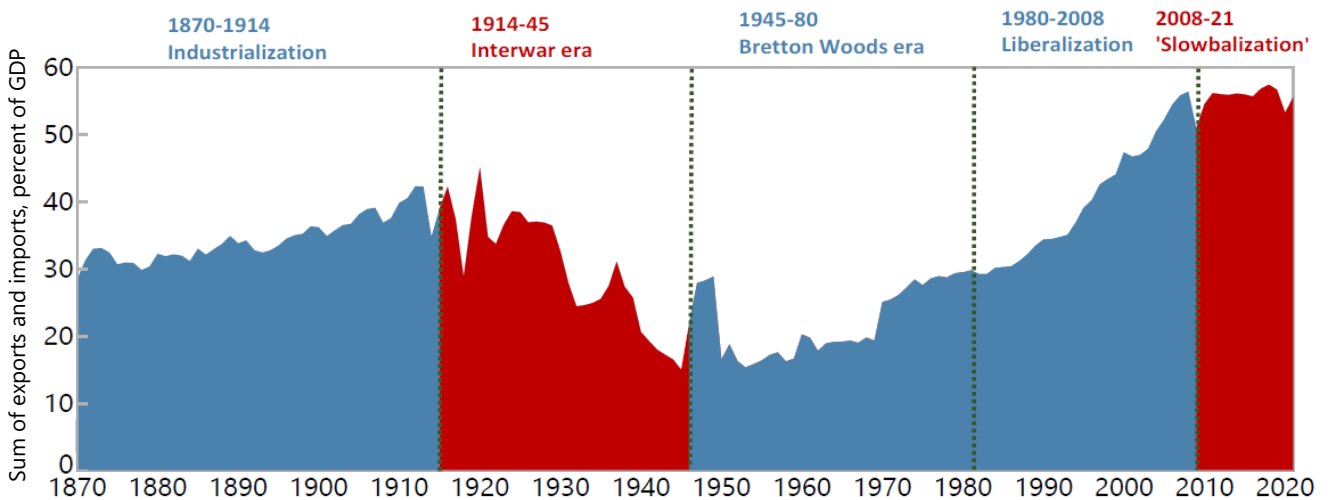


図 17 - 貿易の開放性[60]

図 17 は貿易の開放性の指標、すなわち各国の輸出入額の合計を世界 GDP に占める割合を示している[60]。横軸は 1870 年から 2020 年までの時系列を示している。右側の赤い列を見ると、2008 年の世界金融危機以降は貿易の開放性が停滞していることがわかる。ここで問題は、労働生産性と貿易の開放性に相関関係があるかどうかである。

つまり、1980 年代から 2008 年の金融危機までの自由化の時代には、日米欧などの先進国の製造業は、自由貿易を前提に、付加価値の高い工程だけを自国に残し、それ以外の工程を第三国にオフショアすることで労働生産性を高めてきたという仮説がある。しかし、2008 年の金融危機以降、その前提である自由貿易の拡大が停滞したため、先進国の製造業の労働生産性を向上させるために、これまでとは異なる施策が必要になってきたと言える。

こうした中、2011 年 11 月にドイツ政府が承認した「ハイテク戦略 2020」の柱のひとつであるインダストリー4.0 が世界の注目を集めた。インダストリー4.0 は、デジタル技術の活用によって製造業の労働生産性を飛躍的に向上させることを目標の一つとして提唱された。

インダストリー4.0 の提唱から 15 年が経過した今、日米欧の製造業の労働生産性はデジタル化によって本当に向上したのだろうか。また、中国やインドなど、この 15 年間で台頭してきた他国の製造業の労働生産性以上に強化されているのだろうか。以下の章では、各国の報告をもとに実態と課題を分析し、世界共通の課題を浮き彫りにするとともに、今後の国際協力の可能性を探る。

3.2 日本の活動

3.2.1 労働生産性

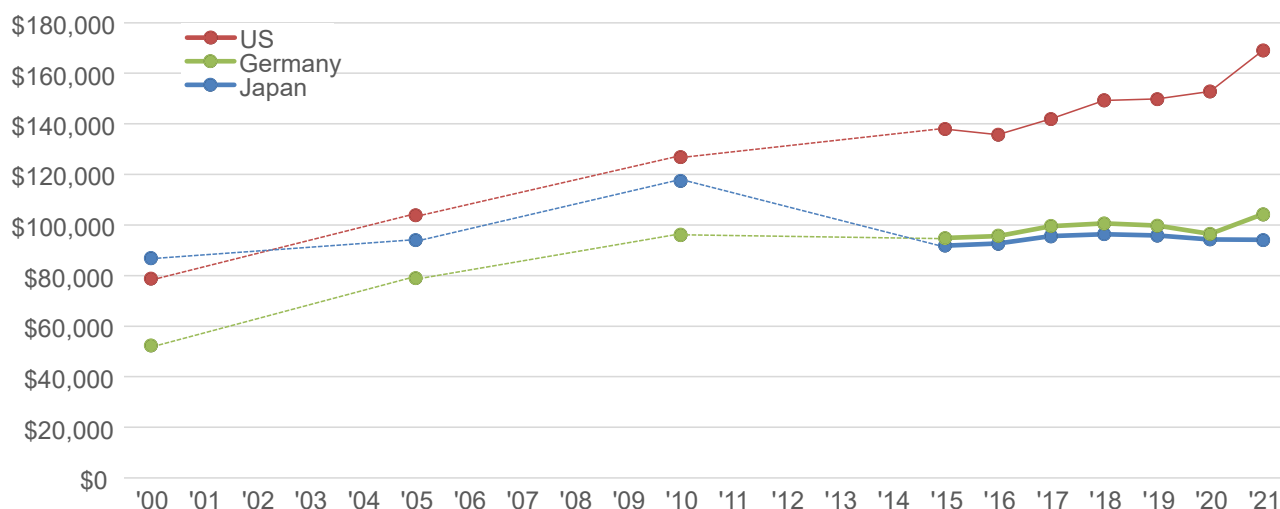


図 18 - 製造業の労働生産性[5]

図 18 は、日本生産性本部が 2023 年 12 月 22 日に発表した製造業の労働生産性である[5]。日本生産性本部は、労働生産性統計を雇用者一人当たりの付加価値額として長年記録している。ここでは、製造業の労働生産性をドルに換算するため為替レートを移動平均して計算している。

3.2.2 インセンティブ

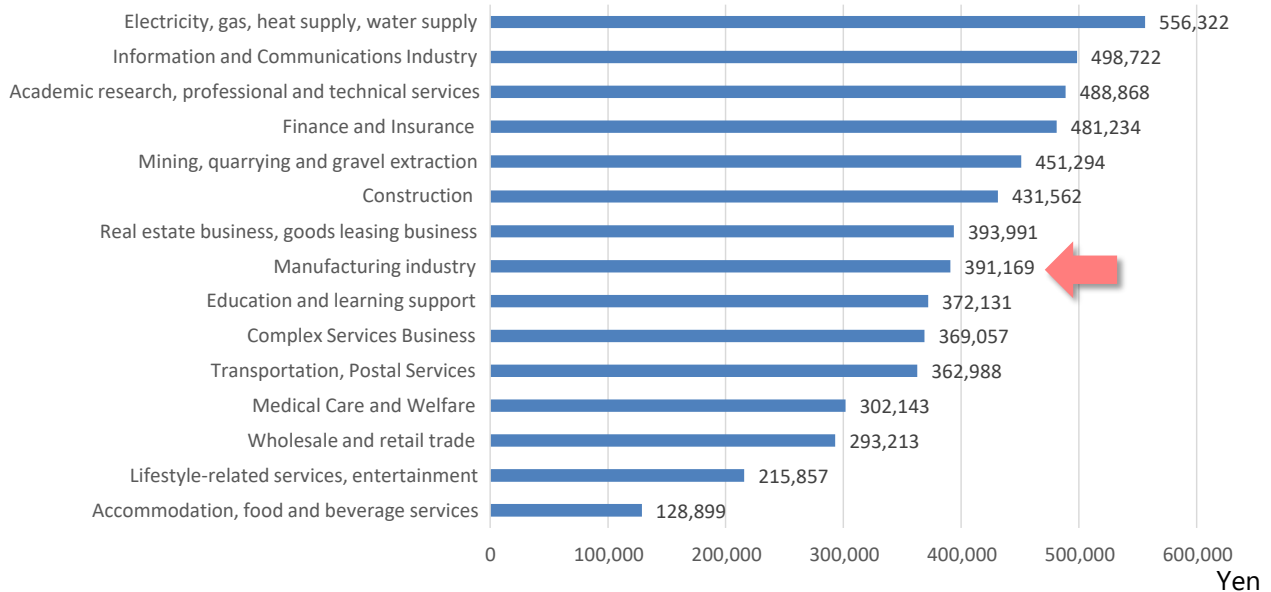


図 19 - 産業別正規労働者一人当たりの平均現金給与月額[61]

図 19 は、総務省統計局が 2022 年に発表した産業別の常用労働者一人当たり平均月額現金給与である[61]。これからわかるように、電気・ガス・水道業、情報通信業などに比べ製造業の賃金が低く、インセンティブの視点では優秀な人材が製造業よりも賃金の高い業種を好むことが人手不足の一因となっている可能性が考えられる。

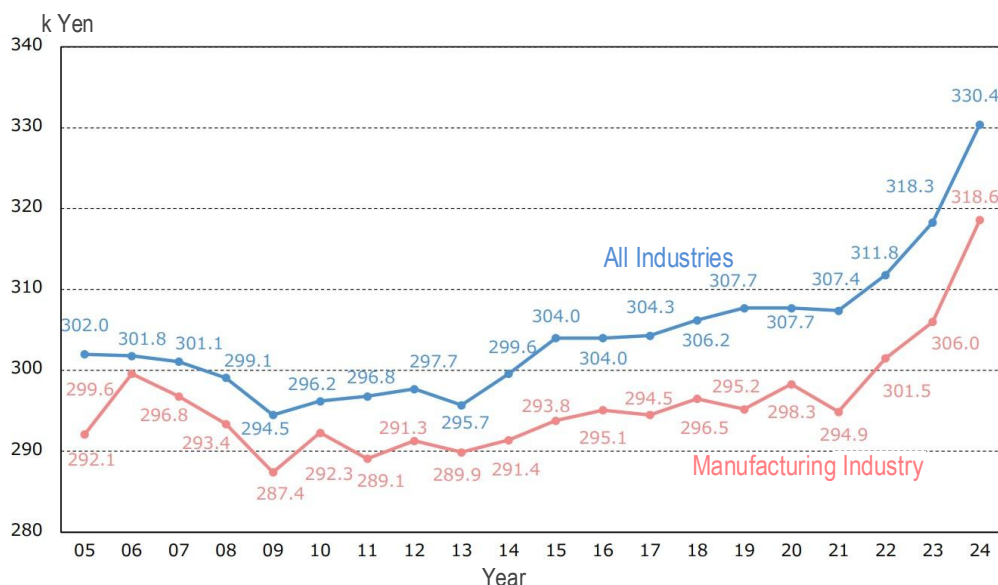


図 20 - 賃金（定期給与）の推移[62]

図 20 に示す全産業と製造業の一般労働者の賃金（定期給与）の推移をみると、2014 年以降上昇傾向にあり、2024 年には全産業が 330,400 円となるのに対し、製造業は 318,600 円となる見込みである[62]。全産業と製造業の賃金格差をみると、製造業の賃金は一貫して全産業の賃金を下回っている。また、両者の賃金格差は 2006 年には 2,000 円程度であったが 2024 年には 10,000 円を超えている。

3.2.3 設備投資と人材育成の状況

はじめに述べたように、労働生産性を議論する上で重要なポイントは、資本依存と人的資本の成長をいかに促進するかにあることから、以下では、我が国製造業における設備投資と人材育成の動向を評価する。

図 21 に示すように、製造業の設備投資は 2012 年 7 月期以降、減価償却費を上回っている[62]。2021 年 4 月期以降は、COVID-19 パンデミックの影響が和らいだこともあり、2021 年 4 月期以降も増加傾向が続いている。

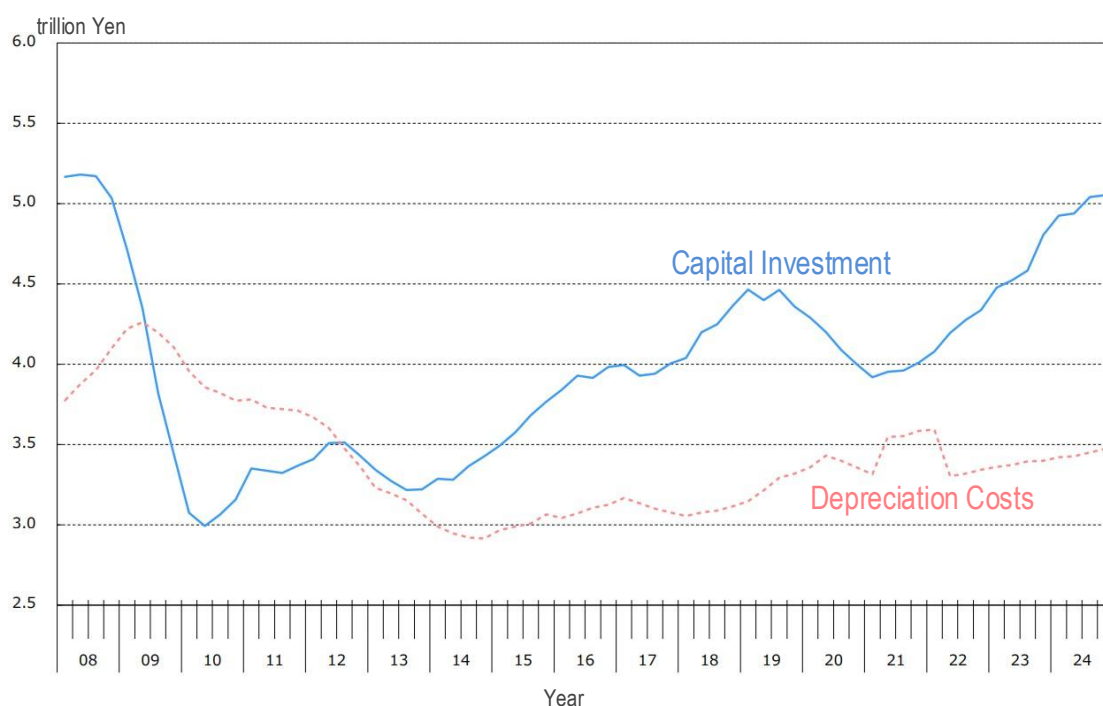


図 21 – 製造業における設備投資額と減価償却費の推移[62]

企業内における労働者のキャリア形成を効果的に促進するため、計画に基づいて従業員の職業訓練を実施した事業主に対して、訓練費用と訓練期間中の賃金の一部を助成する制度が実施されている[62]。人への投資を加速させるため、2022 年度に「人材投資促進コース」と「事業発展リスキル支援コース」が創設され、2026 年度まで高額の補助金で支援される。また、2024 年 4 月からは、人材投資促進コースの長期教育訓練休暇制度が時間単位休暇にも適用され、労働者が柔軟に休暇を取得できるようにするとともに、中小企業の 1 人当たりの時

間数と賃金助成額の上限が引き上げられる。また、自主的な職業能力開発訓練の利用を促進するため、訓練時間の下限を 20 時間から 10 時間に引き下げるほか、「業務に関連する訓練に限る」という要件を、業務に関連しない訓練も含めて認め、長期教育訓練休暇制度との併用を容易にする。

このように、日本政府は人材育成に取り組む事業主への支援を続けている。2023 年度人材開発支援助成金（人材開発支援コース、教育訓練休暇助成コース、人材投資促進コース、事業開発リスキル支援コース）の支給決定件数は 38,190 件、対象労働者数は 136,909 人となっている。

また、評価制度やスキル振興も強化されている[62]。

スキル検定制度は、労働者が保有するスキルの水準を一定の基準に基づき試験・認証する国家資格制度である。2025 年 4 月 1 日現在、133 職種が実施されており、製造業をはじめとする労働者のスキル習得意欲の向上や、労働者の社会的地位の向上に重要な役割を果たしている。2023 年度は全国で約 81 万人が受験し約 36 万人が合格した。1959 年度の制度開始以来、累計で約 872 万人がスキル労働者となっている。また、若年スキル労働者（概ね 22 歳以下）を対象に、スキル競技会を通じて参加国・地域の職業訓練の推進とスキル水準の向上を目指しており、国際交流・親善を目的として技能五輪国際大会にも参加している。

日本の製造業における労働生産性は、その成長の歴史と課題を如実に表している。1980 年代までの劇的な成長を経て、成長の原動力となるべきものは何なのか、そして持続可能な産業を実現するための施策をどう講じるべきなのか、過去数十年にわたり議論が続いてきた。近年の技術革新や人材戦略は、その向上に向けた確かな道筋を示しており、日々激変する社会情勢に産学官が一体となって取り組んでいく必要がある。

3.3 米国の活動

3.3.1 製造業の労働生産性の包括的な分析

米国の製造業の生産性は、技術革新、労働力の動態の変化、そして政策介入によって形成されてきた。米国の労働生産性は、一般的に GDP で測定される総生産と製造部門の総労働時間の比率として定義される。労働統計局（BLS）が報告するこの重要な指標は、経済的価値を生み出す上での労働効率の重要な尺度として機能している。世界の労働生産性の定義は概ね米国のアプローチと一致しているが、地域的な優先事項に対応するため、エネルギー使用量や環境への影響など追加の要素が組み込まれることが多い。こうした違いはあるものの、根本的な目標は世界的に一貫しており、資源利用の非効率性を最小限に抑えながら生産高を最大化することが目標となっている。

3.3.2 製造業の労働生産性の傾向



図 22 - 製造業における労働者 1 人当たりの生産高[63]

米国の製造業労働生産性の軌跡をみると、経済の変化、技術の進歩、そして外的課題によって成長と停滞の時期があることがわかる。1973 年から 1990 年までは、製造業が経済再編、石油危機、グローバル競争の激化に直面したため、生産性の伸びは年率 1.4%に鈍化した。この時期は、製造業がより相互に結びついたグローバル経済に適応していく過程で、非効率性が浮き彫りになった。1990 年から 2007 年にかけての技術的復活は、生産性を年平均 4%成長させるという大きな転換をもたらした。これは、コンピュータ支援設計 (CAD)、ロボティクス、リーン生産技術の採用と、グローバル化およびオフショアリングによって、企業が生産を最適化し、コストを削減できるようになったことによる。しかし、2008 年から 2019 年の景気後退後は新たな課題が生じ、設備投資の減少、労働市場の混乱、そしてサービス志向産業へのシフトにより、生産性の伸びは年率 0.9%に低下した。

COVID-19 パンデミックの間、米国の製造業の生産性は 2020 年初頭に急激な落ち込みを経験し、工場の閉鎖とサプライチェーンの混乱により、2020 年第 2 四半期には生産高が 20%減少した。しかし、その後力強い回復がみられ、2020 年第 3 四半期の生産性は 10.1%上昇した。これは、製造業が自動化とデジタル技術を導入して急速に適応し、操業を維持したためである。こうした成果があったにもかかわらず、製造業は依然として課題に直面していた。パンデミックは IoT やロボティクスといったインダストリー 4.0 技術の導入を加速させ、人手不足の解消と効率性の向上に貢献し、世界的なサプライチェーンの混乱と労働力不足が続く中、長期的な生産性向上の基盤を築いた。

2008~2010 年の金融危機後、インダストリー 4.0 技術への投資にもかかわらず米国の製造業の生産性成長が鈍化した原因は一般的にいくつか考えられる。調査によると、生産性成長の鈍化は広範囲に及び、さまざまな規模のさまざまな業界や企業に影響を及ぼしている。こ

これは、問題が特定の製造分野に限定されるのではなく、製造業全体にわたるより広範な現象であることを示している。また研究開発費の総生産額に対する比率で測定される研究開発集約度が高まっているにもかかわらず、生産性成長を生み出す研究開発の有効性は低下しており、研究開発への追加投資が過去よりも生産性の増分的向上をもたらしていないことを示している。もう1つの要因は、1985年から2005年の間にコンピュータと電子技術が急速に導入されることで生産性が大幅に向上したことによる。これらの技術が普及するにつれて、さらにこれら技術を適用しても利益創出のマージンが増えずに生産性成長の鈍化につながった。また、金融危機後の設備投資の減少は、製造業の近代化と生産性向上を制限しており、新技術の導入や老朽設備の更新を制約している。結局、金融危機後の米国製造業における生産性の減速は、業界全体への影響、研究開発収益の逡減、技術の飽和、そして設備投資の減少など、多面的な問題となっている。

こういった根深い問題にもかかわらず、ハイテク製造業、特に半導体と先端エレクトロニクス分野は堅調な生産性向上を示しており、米国製造業のレジリエンスと適応力を示しており、ロボティクス、AI、IoTといったインダストリー4.0技術の導入は、効率性、精度、拡張性の向上に大きく貢献している。CHIPS法などの政策によって支えられたこれらの進歩は、プロセスの近代化と国際競争力の強化を通じて、生産性の劇的な向上を可能にした。一部の産業は近代化の障壁とまだ闘っているが、最先端技術の統合と将来を見据えた政策の支援は、米国製造業全体における持続的な成長とイノベーションの大きな機会をもたらしている[64]。

3.3.3 生産性と持続可能性の要因

米国製造業における労働生産性は、技術革新、戦略的投資、労働力のダイナミクス、そしてグローバル貿易への配慮といった要素の組み合わせによって形作られており、これらはすべて持続可能性目標とますます密接に結びついている。技術革新は生産性向上の礎であり、ロボットティクス、AI、IoTの統合によって従来の製造プロセスが変革を遂げている。これらの技術は、精度の向上、廃棄物の最小化、生産サイクルの加速化を可能にし、効率性だけでなく環境にも貢献している。2022年には、民間非農業部門における製造インフラのアップグレードへの設備投資は年率2.8%増加した[65]。これらの投資は、効率的な技術を導入し、生産性向上と持続可能性目標を整合させるために不可欠である。

グローバル貿易とサプライチェーンは長年にわたり、コスト効率の高い原材料と市場へのアクセスを提供することで、米国の製造業の生産性向上に極めて重要な役割を果たしてきた。しかし近年の貿易摩擦とサプライチェーンの混乱により脆弱性が露呈し、米国の製造業に調達戦略の見直し促している。これにより、国内生産能力と現地化されたサプライチェーンへの投資が加速し、レジリエンスと環境の持続可能性、そして不安定なグローバル市場への依存を支えている。

労働力の能力も米国の労働生産性において重要な役割を果たしている。米国は高度なスキルを持つ労働力のプールの恩恵を受けているが、製造業の80%近くが資格を持った労働者を確保することが困難であると回答しており、スキルギャップが根強く残っていることが浮き彫りになっている。すなわち、米国の製造業は、人口動態の変化とスキル不足による重大な労働力問題に直面している。2018年のデロイトのレポートでは、2028年までに製造業で240

万のポジション（空きポストの 53%）が熟練労働者の不足により空席のままになると予測されている。2024 年の調査では、この数字は今後 10 年以内に 380 万の空席に増加すると推定されており、問題の深刻化が浮き彫りになっている[66]。労働力の 25%近くがベビーブーマー世代（1946～1964 年生まれ）で、その多くが定年退職時期に近づいている。すでに労働力の 5%が定年年齢を超えており、さらに 20%が 10 年以内に定年を迎えるため、専門知識の大幅な喪失のリスクが高まっている。同時に、この業界に参入する Z 世代の労働者数が少ないことも問題を複雑化させており、製造業はベテラン従業員の退職に対応しながら、人材の補充に苦勞している。この問題に対処するには、人材育成、高度なトレーニング、テクノロジーを活用した採用など、的を絞った戦略を立てて業界の将来の競争力を確保する必要がある。

米国の製造業は、技術革新、資本投資、現地化されたサプライチェーン、そして人材育成への取り組みを統合することで、生産性向上と持続可能性の推進を同時に達成することを目指している。この二つの目標は、グローバルな競争力を維持し、21 世紀の環境課題に対処するために不可欠である。

3.3.4 生産性の世界比較

GDP per hour worked in USD*.

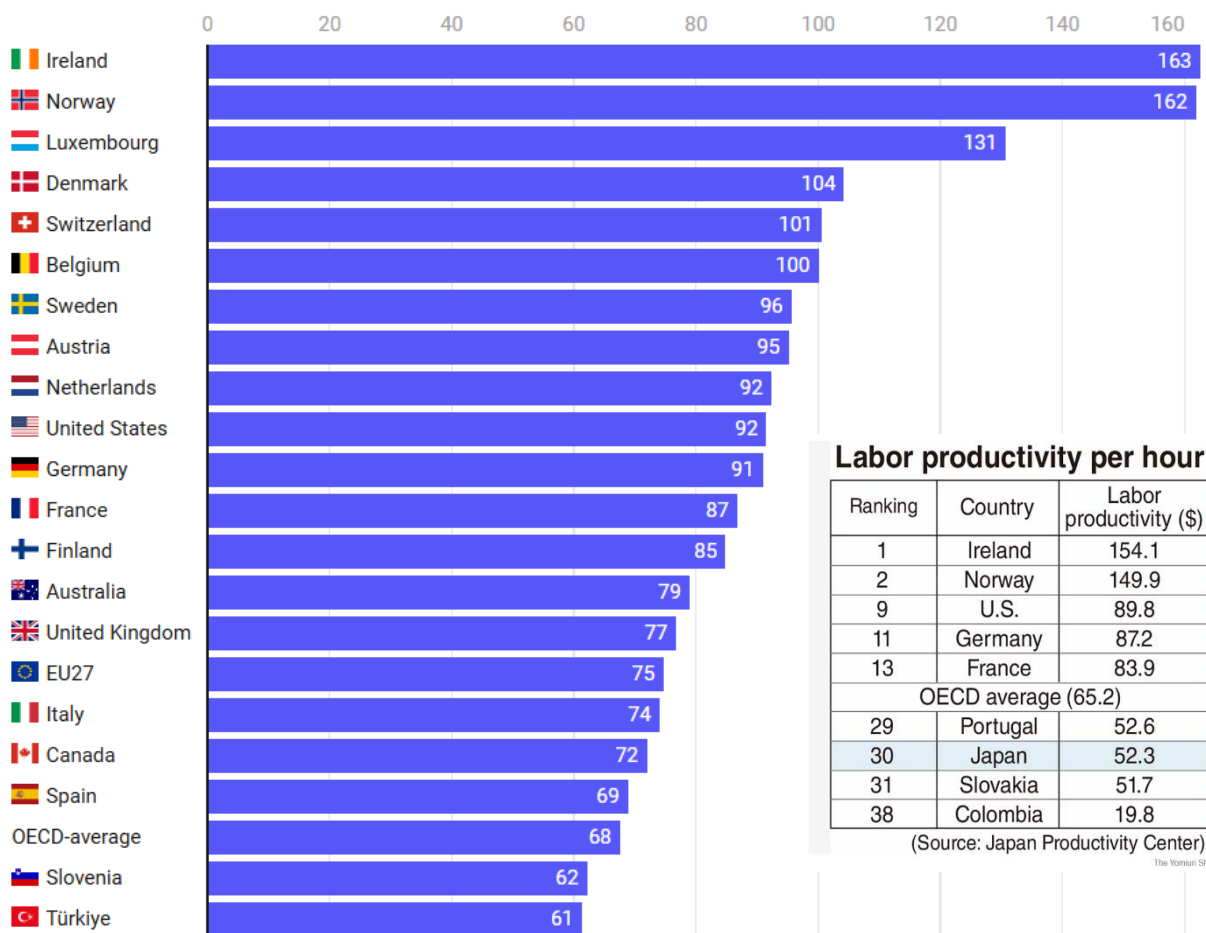


図 23 - 2022 年の生産性水準[67]

米国は世界の製造業の労働生産性において高い地位を維持しているものの、アイルランド、ノルウェー、スイスといった小規模で高付加価値の専門製造業に特化している一部の国に後れを取っている。経済協力開発機構（OECD）のデータによると、2022年には米国の1時間当たりGDPは約90ドルに達し、この指標においてドイツや日本を含む他の主要経済国を上回っている[68]。

米国の製造業の労働生産性は、この分野の適応力とレジリエンスを反映している。歴史的には成長期と停滞期が見られるが、近年の技術進歩と人材戦略は改善への有望な道筋を示している。急速に変化する世界情勢において、スキルギャップ、インフラの制約、経済の不安定さといった課題に対処することは、この分野の競争力を維持するために不可欠である。

3.4 欧州の活動

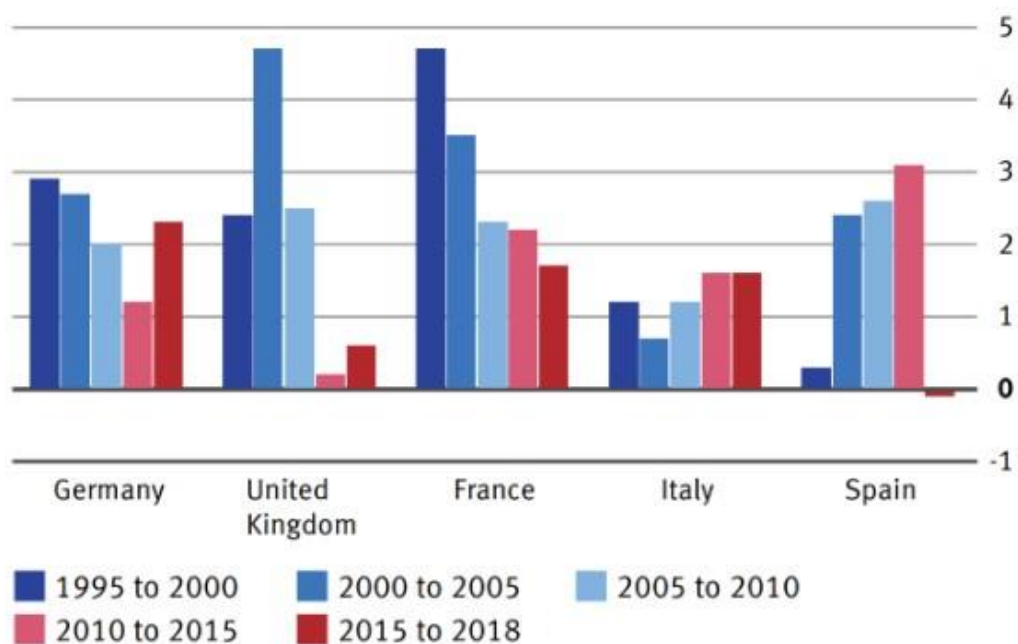


図 24 - 製造業の労働生産性（5年間隔の年平均変化率、%） [69]

図 24 が示すように、欧州の 5 大経済大国（ドイツ、フランス、イタリア、スペイン、英国）は、労働生産性において異なる傾向を示している[69]。ドイツは近年、生産性の伸びが鈍化しているが、これは人口動態の変化とサービス部門の重要性の高まりが一因である。

ドイツは近年、生産性の伸びが鈍化している。この点、図 25 に示すように、ドイツ連邦銀行のデータを使用した Statista のグラフが示すように、1 労働日当たり GDP と 1 労働時間当たり GDP はともに 2023 年以降わずかに減少している[70]。連邦統計局（Destatis）によると、ドイツにおける生産性の伸びの鈍化の重要な理由は、2023 年以降の経済生産量のわずかな減少という純粋に数学的な要因を考慮すると、経済の構造的変化がサービス部門へと向か

っていることによる。サービス部門のほとんどの活動は、製造業の場合よりも生産性向上の可能性が低い傾向にあると考えられており、労働集約的であることが多くテクノロジーで置き換えられる可能性が低い。

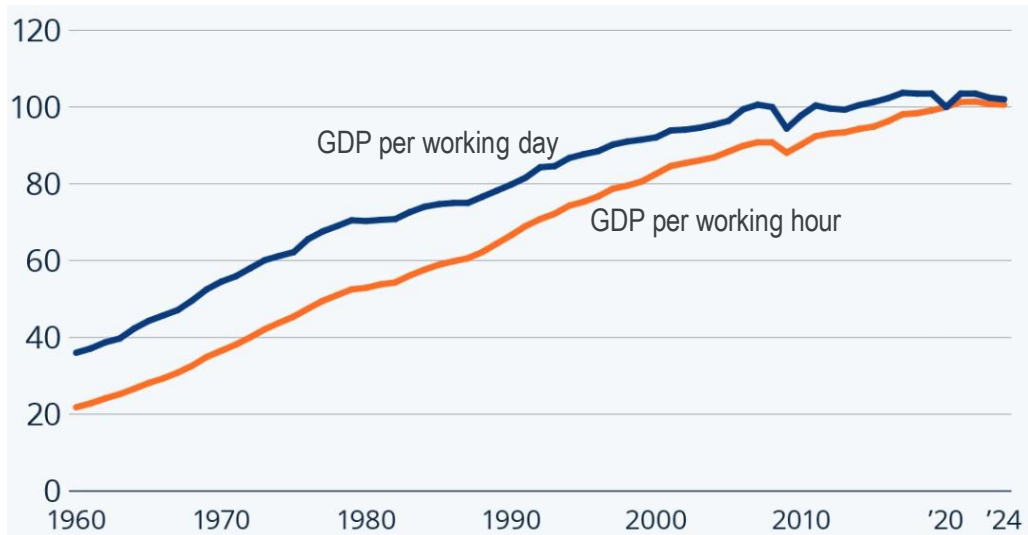


図 25 - ドイツの 1 労働日および労働時間当たりの実質 GDP
(指数、2020 年を 100) [70]

製造業における生産性の向上がこれまで遅々として進まないもう一つの重要な要因は、インダストリー4.0 のアプリケーションがまだ全面的に導入されていないという事実である [71][72][73]。関連する導入上の問題は、多くの場合、不十分なインフラ、高額な初期投資、または既存の生産プロセスの根本的な見直しの必要性に起因しており、導入を妨げている。新しい技術を既存の業務構造に統合することは特に困難であり、中小企業にとっては大きなハードルとなっている。ここでは、資金不足だけでなく、変革を持続可能かつ効率的に進めるための人的能力も不足していることが多い。業務構造を技術革新に適応させるには、技術インフラと従業員のトレーニングの両方に多額の投資が必要であり、生産量に大きな損失を与えることなく移行を管理するには、慎重な計画が必要である。

インダストリー4.0 の取り組みが始まった 2016 年を振り返ると、ドイツは 2007 年以降労働生産性が向上していないという問題に直面していた (図 26[74])。当時、インダストリー4.0 の取り組みだけでも、生産、供給、流通チェーン全体のデジタル化による付加価値だけで、2025 年までにドイツ経済の生産性を 12%向上させることができると試算されていた。しかし、10 年経った現在でも、図 24 や図 25 で述べたように、生産性は向上していない。

労働生産性の伸び悩みは、多様で時に破壊的な技術進歩が進む中で起きている。多くの分野で、包括的な IT ネットワーク化が生産・販売の組織形態に全く新しい潮流を生み出し、革新的なビジネスモデルが既存の構造に挑戦している。こうした発展は、「インダストリー4.0」「ビッグデータ」「モノのインターネット」といった流行語と相まって、生産性向上の大きな可能性を示唆している。それゆえ、経済のデジタル化が生産性の大幅な向上を伴わないよう

に見えるのは、なおさら驚くべきことである。この「生産性パラドックス」は全く新しいものではない。1980年代の「第三次産業革命」においてパーソナルコンピュータが経済生活に導入されたときでさえ、期待された生産性の向上はもたらされなかった[75]。

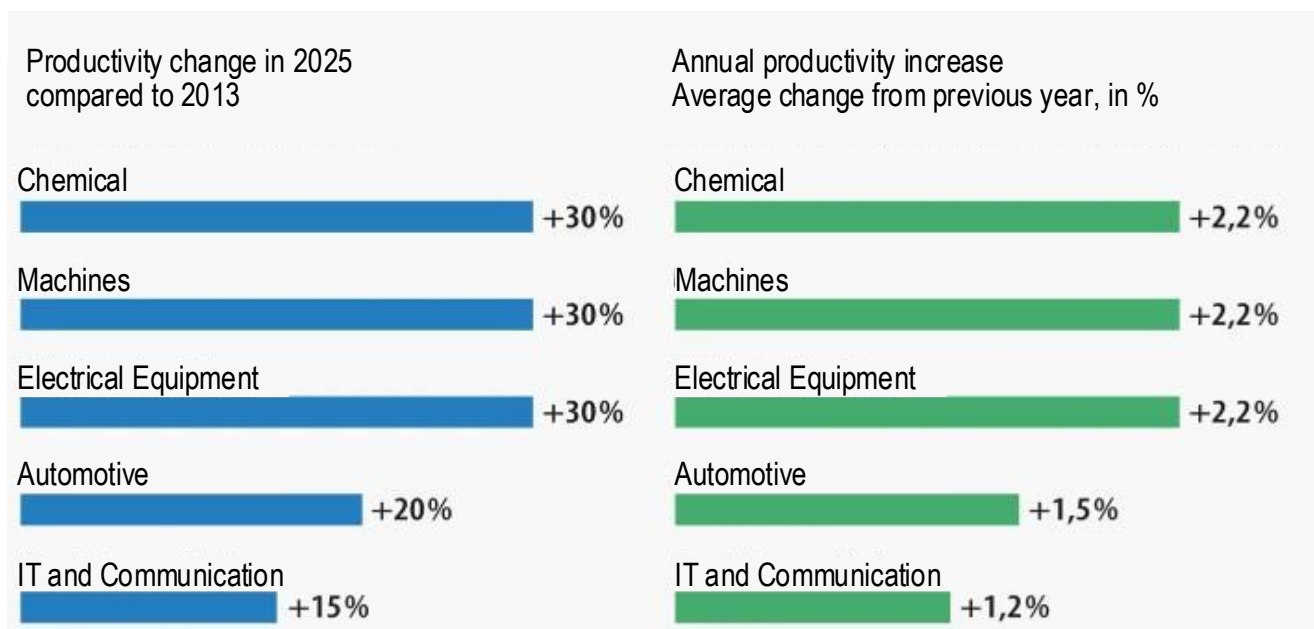


図 26 - フランクフルター・アルゲマイネ・ツァイトゥング社が 2016 年に予測したインダストリー4.0 の取り組みによるドイツの産業別生産性成長率[74]

3.5 地域間の類似点と相違点

2007 年の金融危機以降、3 地域とも生産性の伸びは鈍化している。高付加価値プロセスのみを国内に残し、それ以外はオフショア化するという施策は、金融危機以降見直されている。

各地域はデジタル技術と自動化への投資を進めているが、その恩恵はまだ生産性向上には表れていない。また、生産性向上を持続させるためには人材育成が不可欠であるという考え方は各地域で共通しており、各地域とも人的資本を強化するための教育訓練に投資している。

さらに、各地域は、労働市場のインセンティブを再調整し、高齢化や労働力不足といった人口動態の課題に対処する必要性を認めている。労働力の流動性を改善し、製造業における魅力的なキャリアパスを創出することは、共通の優先課題となっている。

一方で、貿易自由化への対応や、それが生産性に与える影響など、各地域の違いもある。日本は高付加価値工程を国内にとどめ、その他の工程を海外にアウトソーシングしている。戦略的貿易政策を通じて、国内生産とグローバルな貿易機会とのバランスをとることに重点を置いている。米国は、貿易摩擦とサプライチェーンの混乱に対応して、国内回帰と国内生産能力の強化にシフトしている。欧州では、貿易自由化の傾向は多様であり、グローバル・バリュー・チェーンへの統合を目指す国もあるなど、貿易自由化と国内経済の優先事項とのバランスを取り、貿易政策が地域全体の生産性向上を確実に支えることに重点を置いている。

また、優秀な人材を製造業に惹きつけるためのインセンティブ構造も地域によって異なり、労働力の流動性と生産性に影響を与えている。日本の製造業の賃金は他産業に比べて低く、優秀な人材の獲得を妨げている可能性があり、製造業に熟練労働者を惹きつけるインセンティブを強化して人材の確保と生産性の最大化を図ることに重点を置いている。米国では、ハイテク部門は競争力のあるインセンティブを提供しているが、スキルギャップは依然として存在している。製造業の競争力と革新性を維持するため、スキルギャップに対処し、人材育成のインセンティブを強化することに重点が置かれている。欧州のインセンティブは国によって異なり、賃金や投資の低迷により熟練労働者の誘致に苦慮している国もある。製造業の競争力と生産性を維持するため、加盟国全体で人材を引き付け維持するためのインセンティブを強化することに重点が置かれている。

労働の流動性は、さらに異なる状況となっている。日本は歴史的に終身雇用を特徴としてきたが、より柔軟な労働モデルへと徐々にシフトしている。米国の労働市場は全般的に流動的で、制度や雇用者の期待は急速な労働力の再配置に向けられている。欧州では、国境を越えたスキル認定と労働力再配置プログラムに重点を置き、地域間の調整を通じて労働の流動性が支援されている。

以上のように、各地域が共通の問題意識を持ち、産学官が連携して産業の持続可能性に取り組もうとする姿勢は見られるが、具体的な施策の優先順位やアプローチについては、地域の経済状況等を考慮し、地域ごとに独自のものがあることがわかった。このような共通点と相違点を相互に理解し、地球規模での産業の持続可能性の実現に向けた国際協力を推進することが重要である。次章では、特に人材戦略に関する話題を掘り下げ、国際協力の可能性を探っていく。

4 新しい仕事／失われる仕事、ギグ・ワーク、人材戦略

4.1 はじめに

世界経済フォーラム（WEF）は2025年1月、「労働の未来レポート2025」を発表し、今後5年間（2025～2030年）の世界の労働市場の見通しを示した。これは、世界の主要企業1,000社以上を対象とした調査に基づいて分析されたものである[76][77]。同レポートは、生成AIの急速な普及が、産業構造、雇用、求められるスキルに大きな変化をもたらすと予測している。また、以下の5つのマクロトレンドが2030年までに労働市場を大きく変化させるとしている。

1. テクノロジーの進化：デジタル化とAIの進化

デジタルアクセスの拡大、AIやICTの進化、ロボットや自動化の普及は、今後も労働市場に大きな影響を与えるだろう。特にAIは、調査対象企業の6割が自社のビジネス変革を期待する最大のトレンドとして位置づけられており、その影響は雇用の創出・喪失の両面で最大となる。

2. 経済の不確実性：生活費の上昇と成長の鈍化

世界的なインフレは鈍化しているものの、生活費の上昇（調査対象企業の50%が影響を予想）と経済成長の鈍化（42%）は、今後も企業活動に影響を及ぼすだろう。

3. グリーン・トランジション：気候変動対策の加速

気候変動対策への意識の高まりは、労働市場において3番目に大きな変化を促す要因となっている。脱炭素化(47%)と気候変動への適応(41%)への投資の増加は、再生可能エネルギーエンジニアと環境エンジニアの需要を押し上げるだろう。

4. 人口動態の変化：先進国における高齢化と新興国における若年労働力の増加

先進国における労働人口の高齢化と減少(40%)、新興国における労働人口の増加(24%)は、医療・教育関連職の需要増加を含め、労働市場に大きな影響を与える。

5. 地域経済部門：地政学的緊張と保護主義

地政学的緊張の高まり(34%)と保護主義的政策(貿易・投資規制の強化:23%)は、サプライチェーンを再構築し、安全保障関連職への需要を高め、企業にビジネスモデルの変革を促すだろう。

また、今後5年間で、どの職種が最も急速に成長し、どの職種が最も急速に衰退するかを、以下の2つの図で予測している。

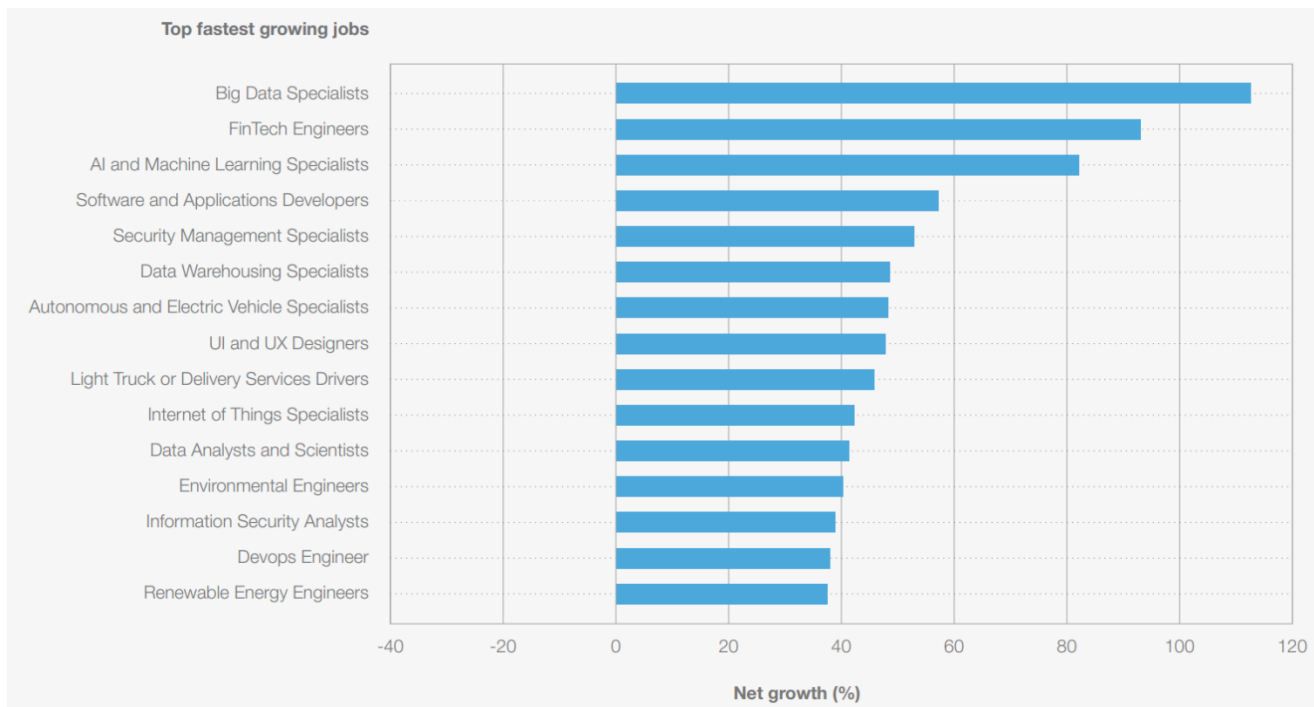


図 27 - 2025-2030 年に最も急成長する職種 [76]

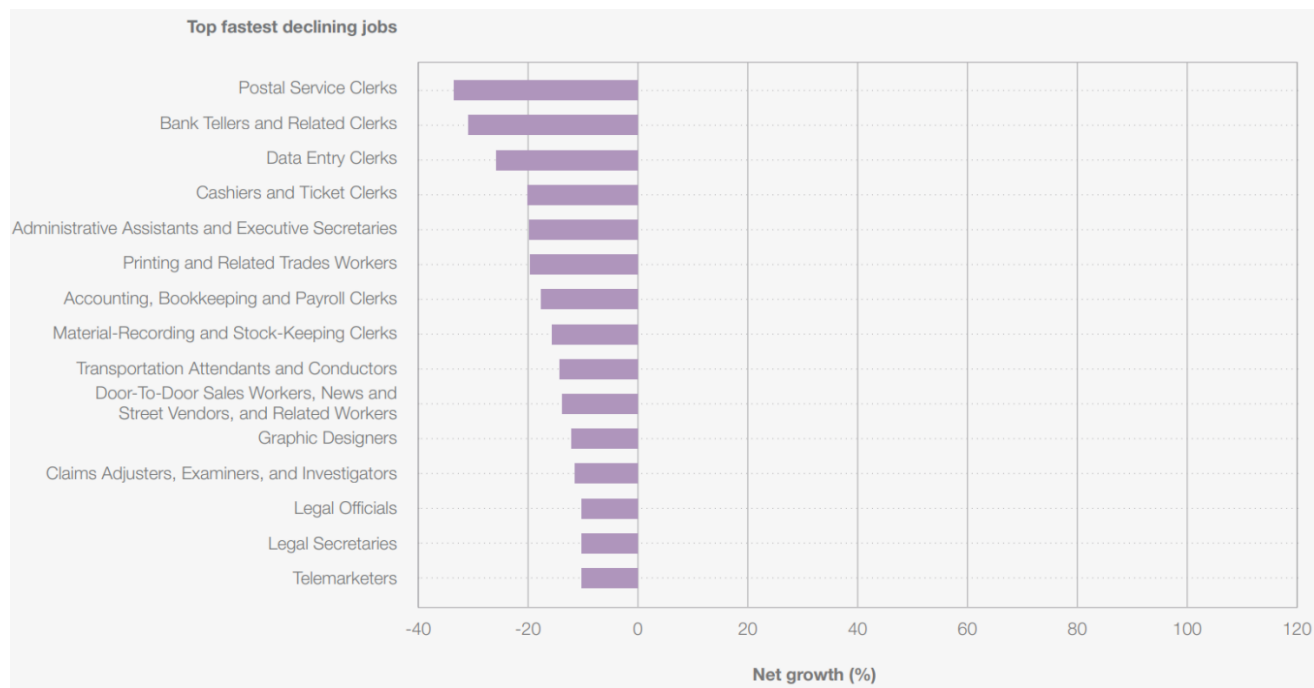


図 28 - 2025-2030 年に最も急速に減少する職種 [76]

図 27 は、2025 年から 2030 年にかけて成長する職種を示している。横軸は増減率、縦軸は職種を示す。ビッグデータスペシャリスト、FinTech エンジニア、AI・機械学習スペシャリストといった職種が成長すると予測されている。一方図 28 は、2025 年から 2030 年にかけて減少する仕事を示している。横軸は増減率、縦軸は職種を示している。郵政事務員、銀行出納係および関連事務員、データ入力事務員の仕事が減少すると予測されている。つまり、成長する仕事のほとんどはテクノロジー関連であり、AI のスペシャリストやビジネス・インテリジェンス・アナリストが最も急成長している。また、最も急速に減少している職種のほとんどは、銀行窓口係や関連事務員を含む事務職や秘書職である。

労働市場の変化に伴い、労働者に求められるスキルセットも大きく変化する。報告書では、2030 年までに、労働者の既存スキルセットの 39%が変質または時代遅れになると予測しており、企業は、継続的な学習、リスキルやアップスキルのプログラムを重視している。また、労働者の専門性や能力の多様化、働き方の多様化の観点から、労働者と労働市場をよりダイナミックかつきめ細かくマッチングさせる社会的な仕組みが求められている。この背景には、近年各国で「ギグ・ワーク」と呼ばれる働き方が広がっていることがあり、この動向も考慮する必要がある。

以下の章では、こうした労働者教育や労働者と労働市場のマッチングを各地域でどのように捉え、労働力マネジメントを考えているのかについてみていく。

4.2 日本の活動

4.2.1 労働力不足の推計

日本の大手人材派遣会社パーソルの研究機関であるパーソル総合研究所は、2024 年 10 月に「将来の労働市場予測 2035」を発表した[78]。推計の結果、2035 年の日本では、1 日の労働需要が 3 億 4,697 万時間、労働供給が 3 億 2,922 万時間となり、1 日あたり 1,775 万時間の労働力が不足することがわかった。これは 384 万人の労働者不足に相当し、労働力不足は 2023 年の 1.85 倍に深刻化する。

2035 年には、外国人を含む日本の総人口は 2023 年に比べて約 770 万人減少し、高齢化も進むと予想されている。こうした人口動態や経済・賃金の状況を考慮すると、本試算では、就業者数は約 375 万人増加する一方、1 人当たりの労働時間は年間約 163 時間減少すると予測している。

女性やシニアの社会進出により就業者数は増加するものの、働き方改革の影響も相まって一人当たりの労働時間は減少する。図 29 に示すように、就業者一人当たりの年間労働時間は、2023 年の 1,850 時間から、2030 年には 1,776 時間、2035 年には 1,687 時間へと減少する。

つまり、日本は多様な働き方を受け入れる社会に変貌しつつあるが、社会が求める労働力需要に対して労働人口が不足しており、既存産業の生産性をさらに向上させるとともに、変化する社会に対応したそれぞれの産業の変革を促すことで、労働力需給のバランスをとる必要がある。

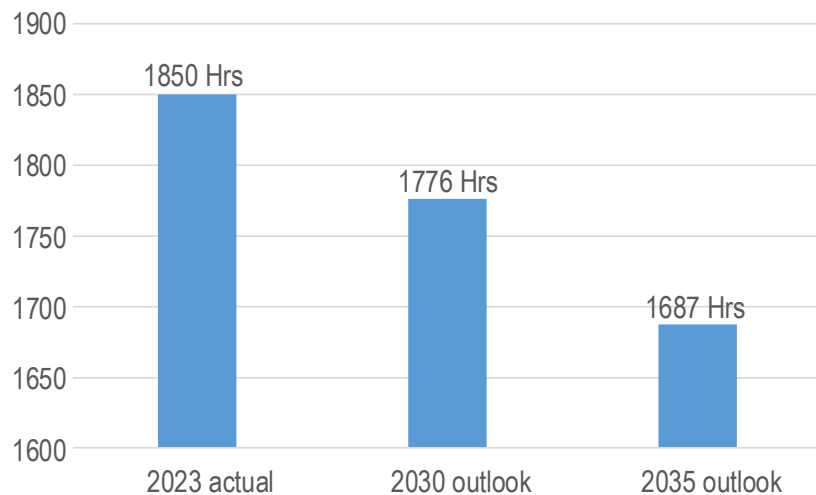


図 29 - 日本の雇用者一人当たりの年間労働時間の見通し [78]

4.2.2 未来人材会議

2022年に経産省が主催した「未来人材会議」は、自動車、電機、産業機械、エネルギー、小売、物流、建設、金融など、さまざまな業界の国際競争力のある大手企業の社長や経営者を招き、「今後必要とされる人材像」について議論した[79]。

その結果、誰もが時代の変化を感じ取り、自分の能力やスキルを常にアップデートしていかなければ、今後加速する産業構造の変革に対応できないことが語られた。これを踏まえ、未来人材会議は2050年の日本の労働需要を推計した。

この推計では、デジタル化や脱炭素化によるスキル等の需要の変化を想定し、まず2050年に各スキル等がどの程度必要とされるかを推計し、職種別・産業別の就業者数を推計した。そして、労働需要の推計にあたっては、以下の2つのシナリオを想定した。

- 高成長シナリオ：デジタル化と脱炭素化が進展し、高い成長率を達成できるシナリオ
- 低成長シナリオ：デジタル化と脱炭素化が停滞し、高成長が達成できないシナリオ

図30は、高成長シナリオによる各職種に必要な労働者数の相対的变化を示している。横軸は増減率、縦軸は雇用を示している。農林水産業労働者、建設・鉱業労働者、オフィスワーカーなどの職種は減少し、製造業労働者、専門技術労働者、サービス労働者などが増加すると予測している。

図31は、高成長シナリオによる主要産業の必要労働者数の相対的变化を示している。横軸は増減率、縦軸は業種を示している。農林水産業、鉱業・建設業、公共サービス業、複合サービス業などが減少し、医療・福祉、教育・学習支援、製造業などが増加すると予測している。

この分析から、日本ではAIやロボットに代替されやすい職業は減少し、代替されにくい職業や新たな技術開発に携わる職業は増加し、産業別の変化は、各産業内の職業構成に大きく影響されると予測していることがわかる。

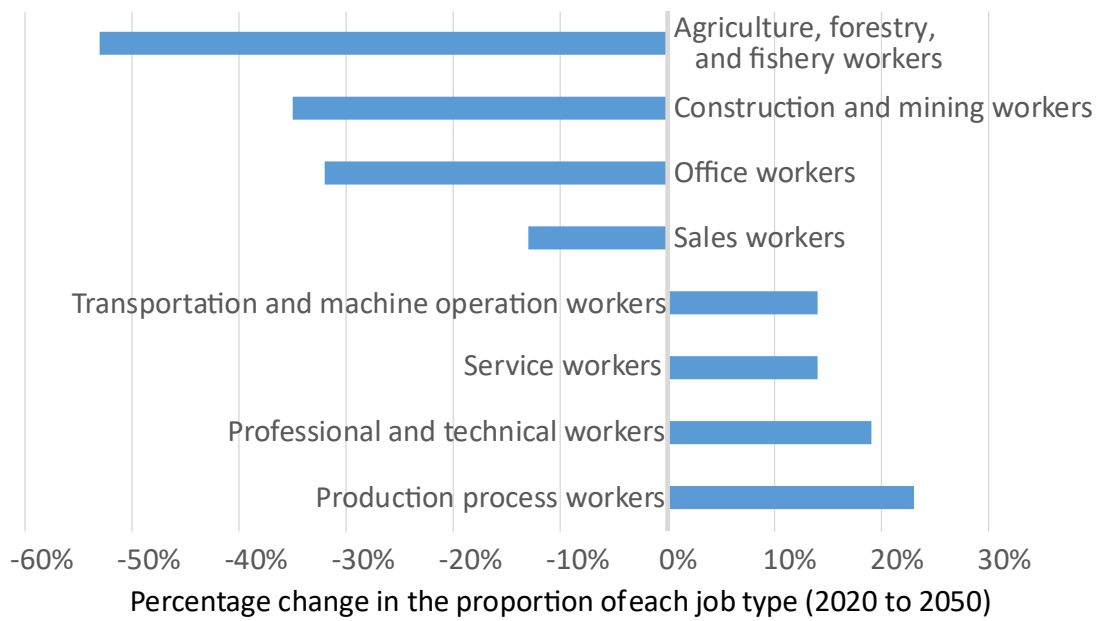


図 30 - 各職種に必要な労働者数の相対的变化（高成長シナリオの場合） [79]

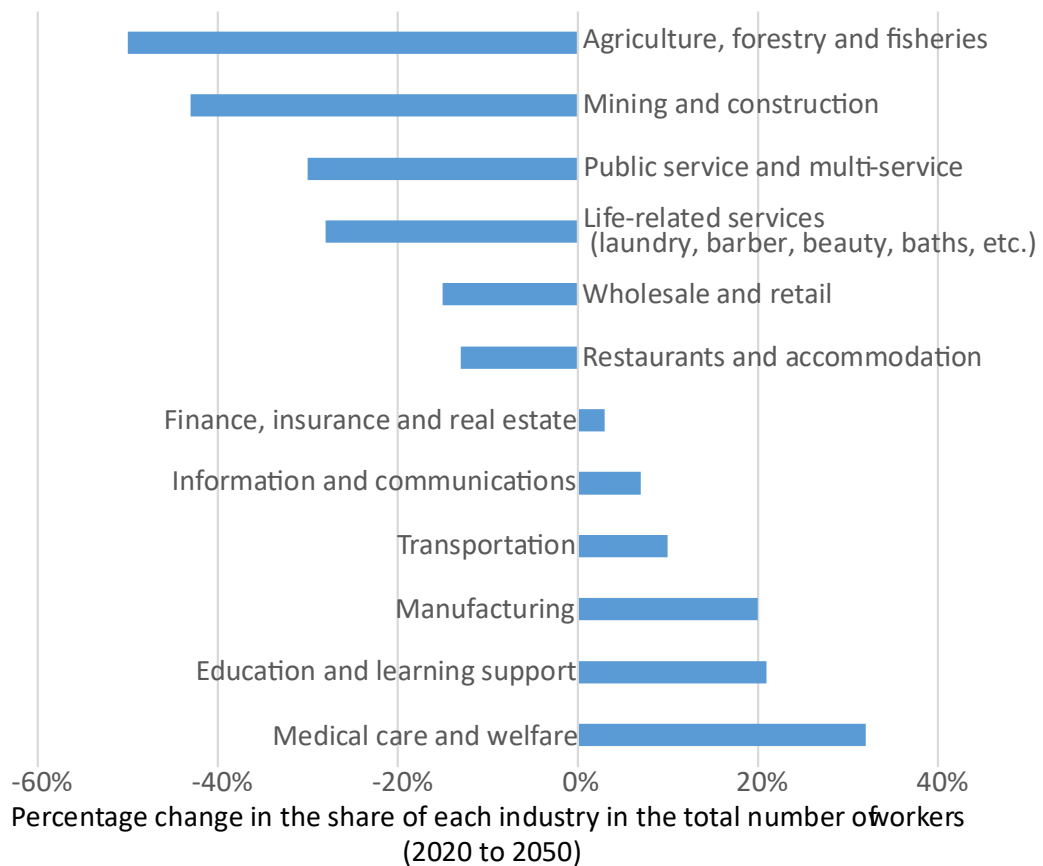


図 31 - 主要産業別の必要労働者数の相対的变化（高成長シナリオの場合） [79]

未来人材会議では、日本の雇用システムを振り返り今後の政策を検討した[79]。

かつて日本の雇用システムは、特に製造業の大量生産モデルにおいて競争力の源泉であると言われていた。右肩上がりの経済成長の中で日本型の雇用システムは長期雇用を前提として長期的視点に立った人材育成を行い、組織の一体感の醸成や企業固有の能力の蓄積に寄与した。また長期雇用を前提に確立された新卒一括採用は、一時的な例外期間を除き、多くの学生が卒業後に就職でき、若年失業率を低水準に抑えるなど社会の安定につながった。

しかし、日本の経済成長が鈍化し、日本企業特有の賃金・人事制度の前提であった「継続的成長」が期待できなくなった 1990 年代以降、日本型雇用システムの限界が指摘されるようになった。

現在、日本企業の従業員エンゲージメントは世界最低水準にある。今の会社で働き続けたいと考える人が少ない一方で転職や起業を志向する人も少ない。また諸外国と比較して、転職が賃上げにつながらない傾向が強い。さらに、40%以上の企業が技術革新によって求められるスキルと現在の従業員のスキルとの間にギャップがあると認識している。

これらの反省を踏まえ、聖域なき雇用・人材育成制度の見直しの必要性を訴え、終身雇用や年功序列賃金に代表される日本型雇用システムと、それを外部とつなぐ領域である採用戦略について議論すべきだと主張した。すなわち、図 32 に示すように、人財マネジメントを通じて、労働者と組織の関係を「閉じた」関係から「選び、選ばれる」関係に変えるべきだと主張した。

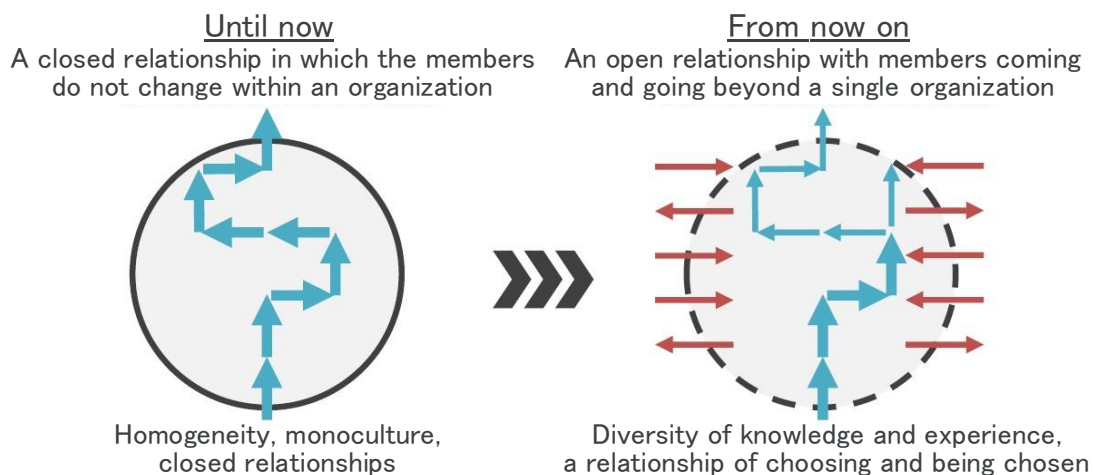


図 32 -労働者と組織の関係（経産省）[79]

結論として、デジタル化や脱炭素化などのメガトレンドによって、求められる能力やスキルが変化し、特定の職種や産業における労働力需要が大幅に増減する可能性がある」と指摘した。その中で、将来を支える人材を育成・確保するためには、雇用・労働から教育まで社会システム全体を見直す必要があると主張した。

4.2.3 ギグ・ワークの現状と考察

経産省はまた、新たなテクノロジーがデジタル経済にもたらしたデジタル関連業務と、これらの業務にマッチするデジタル・プラットフォームを分析した[80]。そして、マッチング・プラットフォームを通じて仕事の機会を得るギグ・ワーカーを、仕事の種類と企業との関係性の観点から分類し、図 33 に示した。

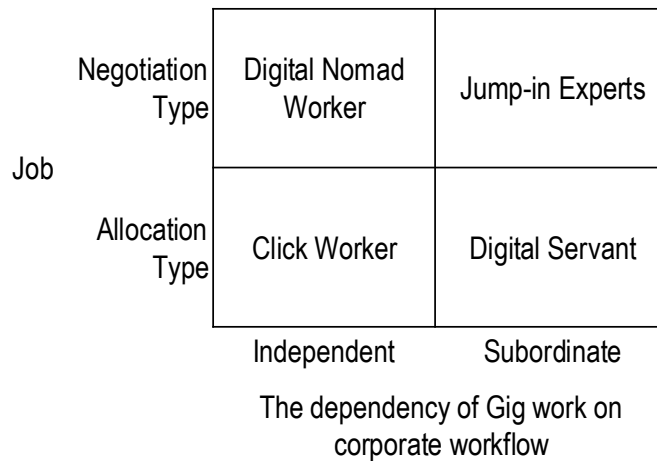


図 33 - ギグ・ワーカーの分類（経産省）[80]

この図で、ギグ・ワーカーには、企業のワークフローに縛られ、プラットフォームを通じて仕事を割り当てられる人から、仕事を確保するために個人的に交渉する、より高度なスキルを持つギグ・ワーカーまで、さまざまな人がいると経産省は指摘している。ギグ・ワークには、労働者の多様な就労ニーズに対応できる労働市場として、必要なスキルを持った人材をいつでも確保でき、従来必要だった人材育成の負担が軽減されるメリットがあるとしている。その一方で、労働者にとっては、安定した雇用機会が保証されないため収入が不安定になる、スキルが前提となるため研修によるスキルアップの機会がないなどのデメリットもあると指摘している。

つまり、技術革新によって労働市場が二極化し、高いスキルを持つ労働者の選択肢が増えることで、スキルのミスマッチが減り、スキルプレミアムが拡大する可能性があるとして指摘している。また、労働市場の二極化に伴い、労働市場全体で中スキルの雇用が減少したため、低スキルの労働者は中スキルを習得していても、自分のスキルに合った仕事を見つけるのが難しくなり、雇用ミスマッチが残っていると指摘している。この問題を解決するためには、義務教育や高等教育で新たに必要な知識や経験を身につけるだけでなく、生涯にわたって学び続けることができるリカレント教育システムの構築が必要だと指摘している。

しかし、そのような教育機会を設けても、高いスキルを身につけられない労働者は一定数存在する。そのような労働者が積極的に社会参加できるようにすることは、人間中心の持続可能な社会を構築する上で重要な視点であるが、日本政府や関係者からはそのような議論はまだ出てきていない。

4.2.4 スポット・ワーク市場の拡大と今後の課題

KPMG ジャパンは、日本のスポット・ワーク市場に注目し、個人の働き方の選択肢がどのように変化しているかを分析している[81]。この分析において、スポット・ワークとは「単発の短期的な仕事」のことであり、「単発のアルバイト」と呼ばれる雇用主との雇用契約に基づいて働くことと、「ギグ・ワーク」と呼ばれる個人として委託を受けて働くことを組み合わせた概念としている。

それによると、日本におけるスポット・ワーク仲介サービスの市場規模は、2021年から2023年にかけて年平均30%近い成長率で伸びているという。これまではCOVID-19パンデミックにより、配食などを請け負うギグ・ワークが注目されていたが、最近では雇用契約による単発アルバイトの増加が目立っている。

このような市場拡大の背景には、日本における生産人口の減少問題、デジタル・プラットフォーム上での求職者と求人者のマッチングから契約や支払い手続きまでワンストップで提供できるテクノロジー・インフラが整備されたこと、日本政府が2018年に副業・アルバイト推進ガイドラインを作成して幅広い分野での雇用やアルバイトを支援する環境整備を進めていること、などがあるという。その結果、これまで本業以外の労働が認められていなかったケースでも副業やアルバイトが可能になり、それ以外の働き方をする人が増えていると指摘している。

今後は労働需給が逼迫し、人材獲得競争が激化して圧倒的な売り手市場が形成され、個人が働きたい企業や働き方を選びやすい時代がやってくると指摘する。スポット・ワーク市場の拡大により、個人が複数の収入源を確保し、ワークライフバランスを実現し、自分のキャリア志向や仕事内容をチェックし、希望する仕事に就くために必要なスキルを身につけることが容易になる。その一方で、企業が採用する企業としての魅力を高めるためには、これまでの仕事をスポット・ワークの採用に適用できるようにするための「仕事のモジュール化の推進」、求職者を迎え入れて支援するための「多様な働き方やキャリアパスを受け入れる社内制度の構築」、「スポット勤務によるスキル習得・向上の機会の提供」が必要だと指摘している。

つまり、年功序列型賃金制度や終身雇用制度といった日本社会の伝統的な働き方を見直し、労働の持続可能性を高めることが、個人と企業の双方に課せられた当面の課題なのである。

4.3 米国の活動

デジタル化、自動化、エネルギー転換が労働構造を再構築する中で、米国の労働市場は大きな変革期を迎えている。米国は、労働力システムの中核的な特徴として、適応性と流動性を重視している。この柔軟性は、歴史的に米国がショックを吸収することを可能にしてきたが、同

時に課題ももたらしている。雇用創出と雇用喪失が同時に発生し、ギグ・ワークやコンティンジェント・ワーク（臨時的な労働）が拡大し、製造業や先端技術分野では依然としてスキル格差が根強く残っている。

こうした状況を受け、2025年以降の米国の労働力政策は、産業競争力、デジタル・トランスフォーメーション、そして労働力のレジリエンスを結び付ける、より統合的なアプローチへと移行している。連邦政府の取り組みや官民連携は、AI、クリーン・エネルギー、そして先端製造業によって形作られる産業に向けて、次世代の労働者の再教育、スキルアップ、そして準備にますます重点を置いている。同時に、ギグ・ワークは製造業のエコシステムにおいてより顕著な役割を果たしており、労働市場への参加機会と不安定雇用のリスクの両方を生み出している。本章では、米国における雇用創出と雇用喪失の傾向、製造業におけるギグ・ワークの役割の変化、および、熟練した適応力のある包括的な労働力を確保するために追求されている戦略を検証する。

4.3.1 雇用の創出と喪失の動向

米国の工業・製造業の労働力は、技術の進歩、自動化、進化する経済政策により、急速な変化を経験している。製造業では、新たな投資と雇用創出が見られる分野がある一方で、自動化、AIによる効率化、グローバル・サプライチェーンの変化により、雇用減少に直面している分野もある。BLS とマッキンゼー・グローバル・インスティテュートのデータによると、こうした傾向は 2033 年までに工業・製造業の雇用機会を大きく変化させる。総雇用者数は 2023 年の 1 億 6,780 万人から 2033 年には 1 億 7,460 万人に増加し、10 年間で 4.0% 増加すると予測されている。しかし、この成長は業種間で均等には分配されるわけではなく、ヘルスケア、専門サービス、クリーン・エネルギーなどの分野では大幅な成長が見込まれる一方で、製造業と小売業は、図 34、図 35、図 36、図 37 に示すように、雇用の減少または成長の鈍化が見込まれる [82]。

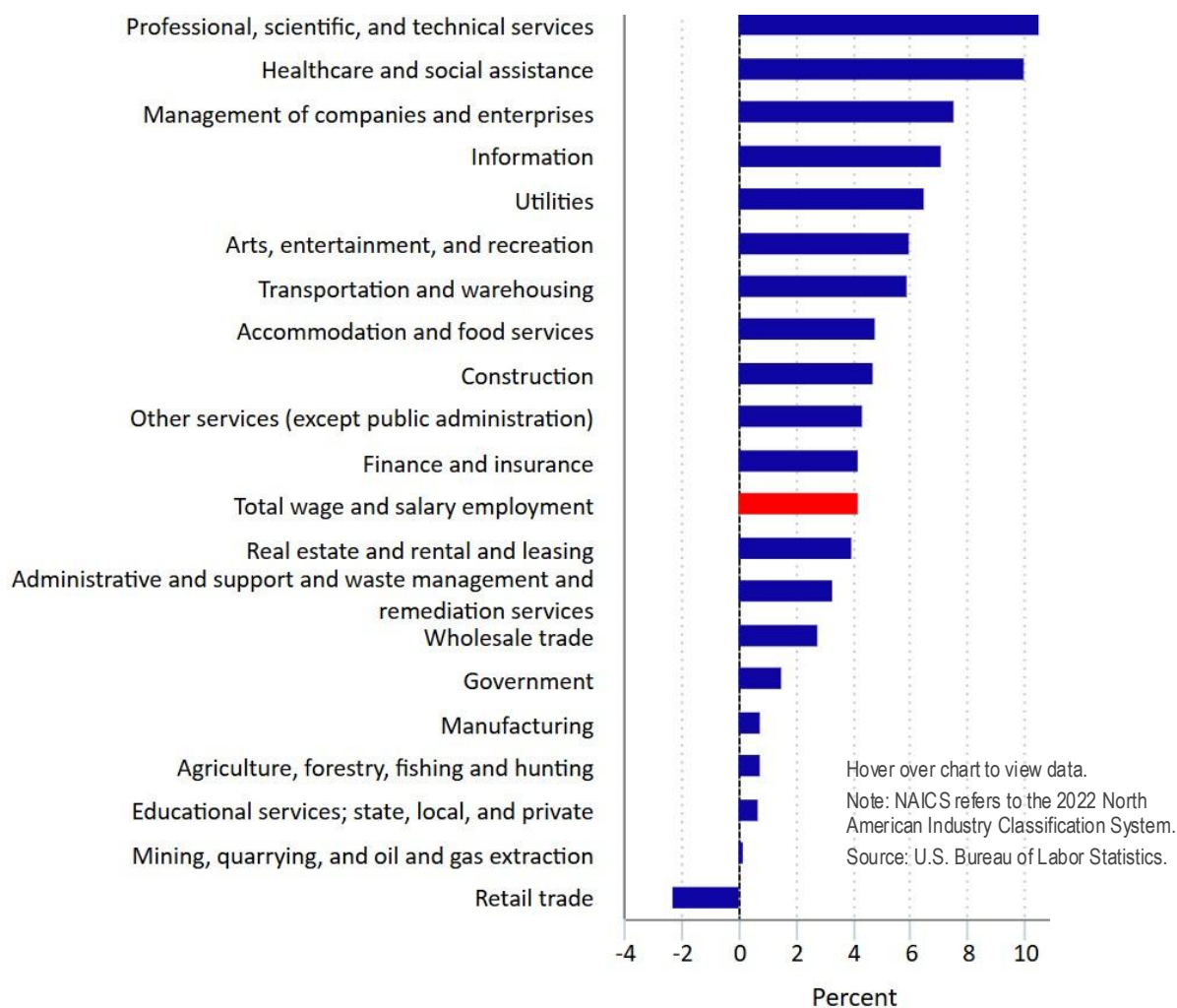


図 34 - 雇用を形成する主な傾向(1)
 (NAICS 分野別の賃金・給与雇用の変化率、2023-33 年) [82]

NAICS: North American Industry Classification System, 北米産業分類システム

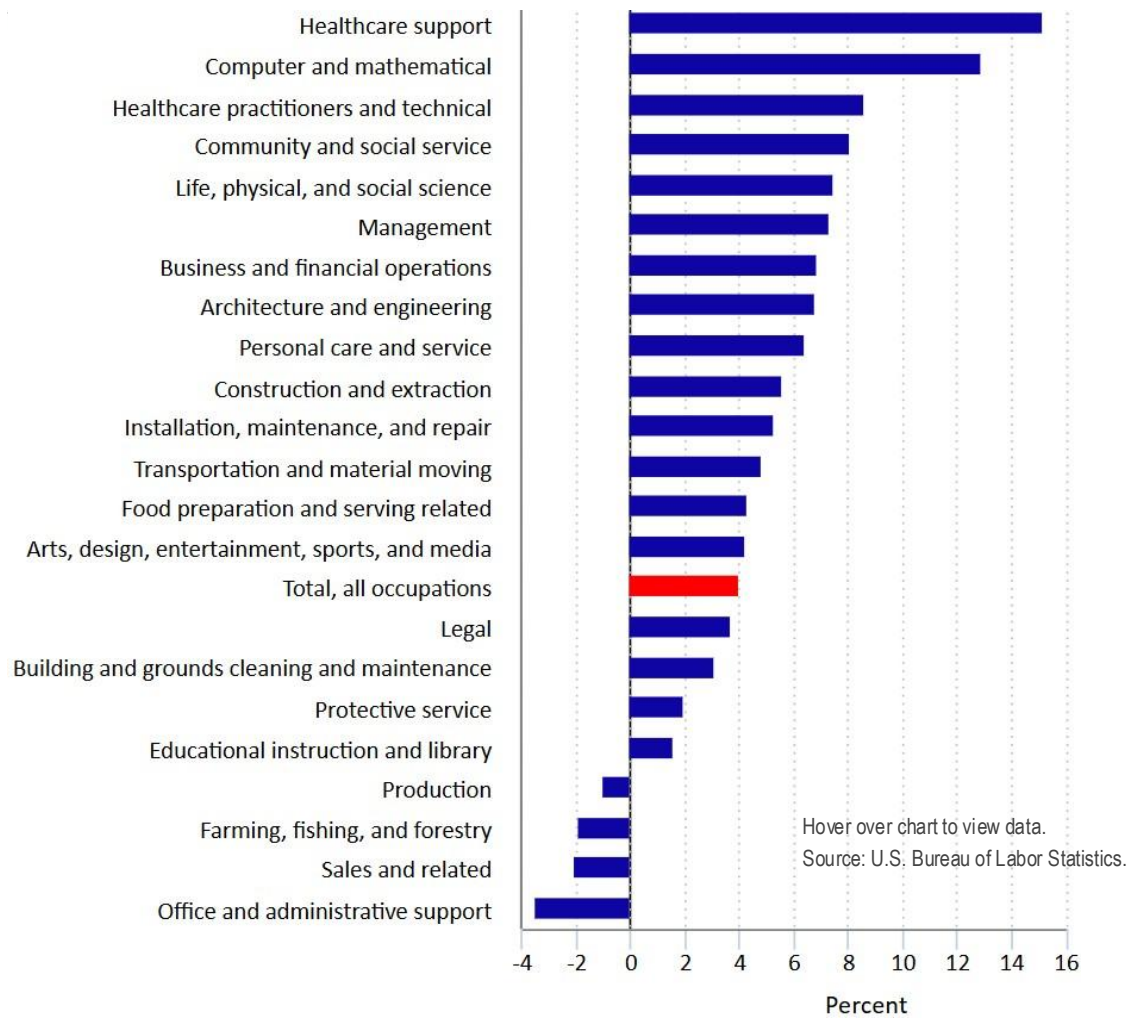


図 35 - 雇用を形成する主な傾向 (2)
 (職業分類別雇用者総数の変化率、2023-33 年) [82]

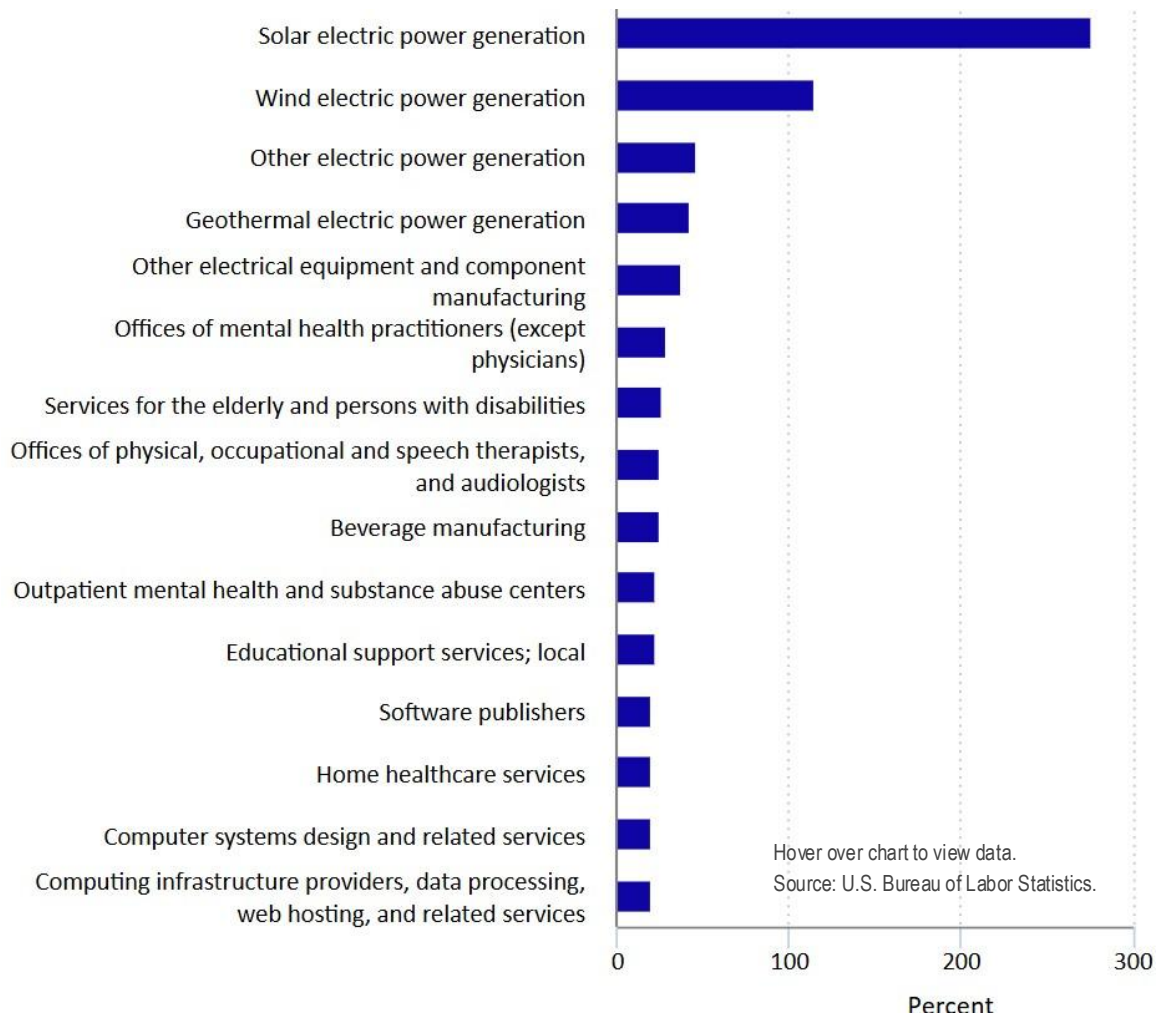


図 36 - 雇用を形成する主な傾向 (3)
(急成長する産業 15 業種の変化率、2023-33 年) [82]

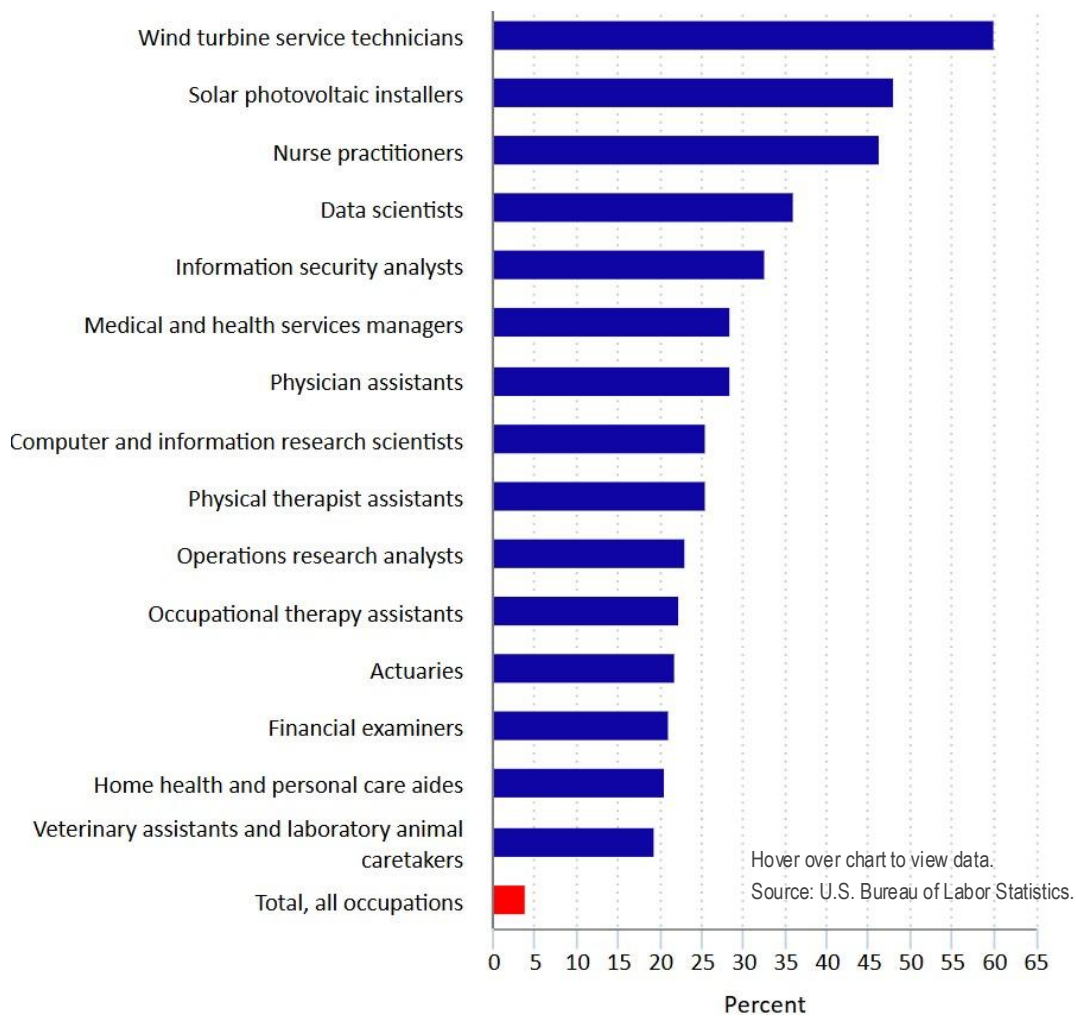


図 37 - 雇用を形成する主な傾向 (4)
(急成長する 15 職種の変化率、2023-33 年) [82]

2023～2033 年にかけての BLS 雇用予測は、予想される経済、技術、人口動態の変化に基づき、産業と職業における雇用の主要トレンドを概説している。本報告書では、雇用動向を形成する 4 つの主要要因として、AI、クリーン・エネルギー、EV、IT を取り上げている。また、医療、教育、レジャー・接客業、小売業、運輸・倉庫業など、様々な分野の予測も行っている。以下は、産業・職業別雇用予測の主な結果の要約である。

主な雇用予測 (2023～2033 年)

- 総雇用者数は 4.0% 増加し、2023 年の 1 億 6,780 万人から 2033 年には 1 億 7,460 万人へと 670 万人の雇用が増加する。
- 医療・社会補助が最も雇用を増やし (230 万人)、新規雇用全体の 3 分の 1 以上を占める。
- 専門・科学・技術サービスは、IT と AI 関連サービスの旺盛な需要に牽引され、最も急成長する分野となる。

- 小売業は、電子商取引の拡大と自動化を反映して、雇用が減少する唯一の主要部門である。

1. AI と自動化

- AI は生産性を向上させるが、事務、販売、顧客サービスなどの雇用需要を減少させる。
- 弁護士アシスタント、グラフィックデザイナー、放送アナウンサーは、AI の自動化により成長が鈍化するか、雇用が減少する。
- AI に精通した専門家（ソフトウェア開発者、サイバーセキュリティ・アナリスト、データ・サイエンティストなど）の需要は大きく伸びる。

2. クリーン・エネルギーと持続可能性

- 太陽光発電産業は 275.9%成長し、雇用が 35,700 人増加する。
- 風力発電産業は雇用が 115.1%増加し、風力タービンの技術者の雇用が最も急増する（60.1%増）。
- 原子力発電と化石燃料発電の雇用は減少し、それぞれ 5,900 人（-15.9%）と 24,900 人（-32.6%）減少する。

3. EV

- EV の生産台数は、2033 年までに新車全体の 40%まで増加する。
- EV 用バッテリーの製造業は 37.7%成長し、雇用が 62,200 人増加する。
- 自動車部品製造は 21.5%縮小し、123,300 人の雇用が失われる。

4. IT

- ソフトウェア開発者（17.9%増）と情報セキュリティ・アナリスト（32.7%増）の需要は、AI の採用とサイバーセキュリティのニーズにより増加する。
- クラウド・コンピューティングとデータ分析の仕事は急成長する。

持続可能な慣行を優先しながら生産性を高めることを目的とした先進的製造技術への移行は、雇用情勢を大きく変化させ、新たな機会を生み出すと同時に、大きな課題ももたらす。2023 年の BLS の報告書によると、機械オペレーターや組み立て工といった伝統的な製造業の職種は、今後 10 年間で減少するか成長が鈍化すると予測されている。一方、ロボティクス、AI、持続可能性アナリストなどの先端製造分野の職種は、20%以上の成長が見込まれている [83]。また、再生可能エネルギー製造や EV 生産など、グリーン・テクノロジーを採用する産業も、この変革の重要な推進力となっている。例えば、図 38 に示すように、米国エネルギー

省の報告によると、風力タービンとソーラーパネル製造の雇用は 2020 年以降、毎年 12.8%増加している[84]。

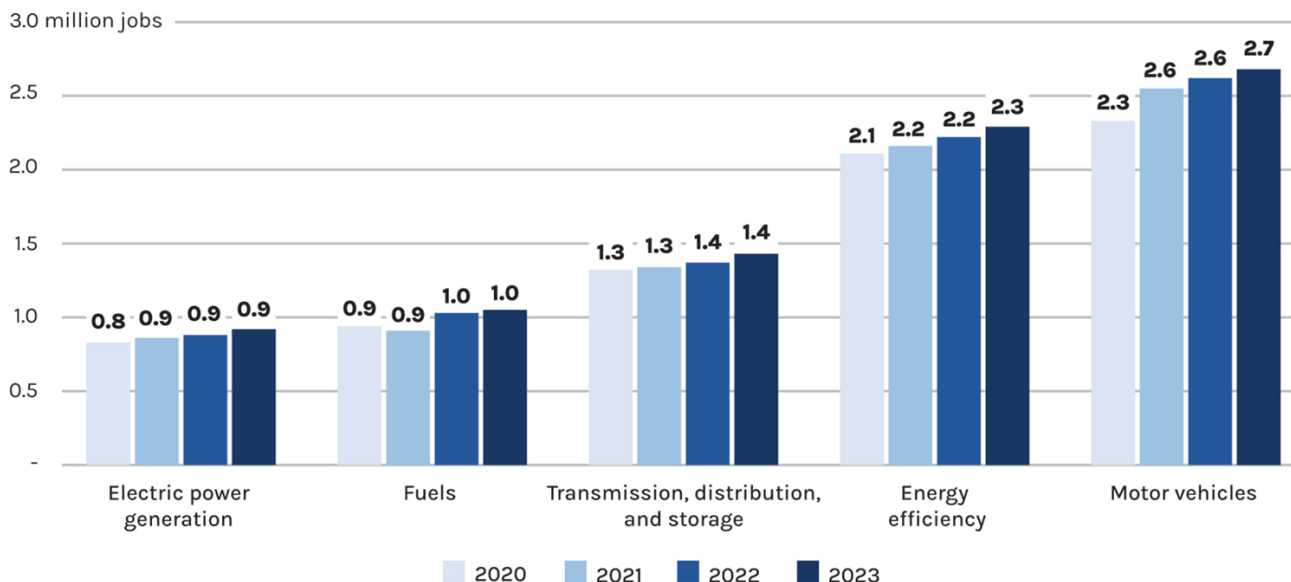


図 38 - エネルギー分野の雇用（技術別、2020～2023 年、単位：百万）[84]

こうした変化に対応するため、労働力は新たなスキルを習得して適応していく必要がある。STEM（科学・技術・工学・数学）の専門知識、デジタル・リテラシー、そして技術的な問題解決能力を必要とする職種が最も大きな成長が見込まれる。製造業がテクノロジー主導型になるにつれ、インダストリアル・エンジニア、オートメーションに関わる専門家、ロボティクス専門家の需要が高まるだろう。同時に、電気技師は 10.8%、電気請負業者は 6.6%の雇用増加が見込まれる。

全体として、米国の労働市場は急速に進化しており、医療従事者、AI・テクノロジー専門家、クリーン・エネルギー専門家の需要が高い一方、化石燃料に依存する産業、伝統的な小売業、手作業による組立式生産は衰退に直面している。産業・製造業の雇用市場は大きな変革期を迎えており、ハイテク、オートメーション、クリーン・エネルギー関連の仕事が拡大する一方で、従来の労働集約的な役割が縮小している。AI 主導の自動化、再生可能エネルギー製造、高度なデジタル加工が雇用風景を再定義する中で、離職した労働者が新興分野に移行できるようにするためには、再スキルアップと労働力訓練が不可欠となる。今後 10 年間は、ますますオートメーションとテクノロジーの主導が進む産業経済に備えるために、戦略的な人材育成の取り組みが必要となる[85][86]。

2025 年以降のモデルでは、エネルギー資源を豊富にする政策にもかかわらず、化石燃料関連の雇用は着実に減少する。石炭火力発電は最も大きな減少に直面し、石油・ガスは LNG 輸出と石油化学製品の需要によって緩やかに縮小する。対照的に、原子力発電は高技能・長期雇用の成長エンジンとして台頭し、SMR と先進的な原子力プロジェクトが 2050 年までの労働力拡大を牽引する。この乖離は、化石燃料の減少を管理しつつ、産業の持続可能性と労働力の

回復力の柱として原子力とクリーン・エネルギーに投資するという米国の戦略を浮き彫りにする。

4.3.2 製造業におけるギグ・ワークの役割と動向

米国製造業は、技術の進歩、労働力の原動力の変化、代替雇用モデルへの依存の高まりによって、根本的な変革を迎えている。業界を形成する最も大きな変化の1つは、ギグ・ワークの台頭である。かつては主にアプリベースのサービスに関連していたが、ギグ・ワークは今や製造業務の重要な要素となっており、企業が労働力不足に対処し、スキル需要を満たし、業務の俊敏性を高めるのに役立っている[87][88]。

製造業におけるギグ・ワークの役割

ギグ・ワークは製造業にとって目新しいものではないが、その範囲と重要性は近年拡大している。従来、企業は短期プロジェクトや季節労働のニーズを満たすために臨時労働者や契約労働者に依存していた。今日、製造企業はギグ・ワーカーを生産、保守、サプライチェーン管理などの中核業務に組み込んでいる。労働力不足やスキルギャップの拡大により、企業が正社員の雇用に苦戦する中、こうした労働者の需要は高まっている[89]。

この傾向の主な原動力となっているのは、正社員の確保と定着が依然として困難であることだ。米国の製造業は2030年までに210万人の労働者不足に直面すると予測されているが、これは主に経験豊富な労働者の退職と、若い世代が製造業でのキャリアを追求することに関心がないことが原因である。長らく製造業の労働力の大部分を占めてきたベビーブーマー世代が急速に製造業を去りつつあり、若い労働者は製造業の仕事を時代遅れで単調あるいはキャリアアップの可能性に欠ける仕事と認識することが多い。製造業におけるハイテクの役割を近代化し促進する取組みにもかかわらず、企業は採用の課題に直面し続けている。

同時に、スマート製造とインダストリー4.0テクノロジーの台頭は、雇用要件を変えつつある。オートメーション、ロボティクス、AI、IoTは現代の製造環境において不可欠なものとなりつつあり、高度なスキルを持つギグ・ワーカーに新たな機会を生み出している。製造業は正社員だけに頼るのではなく、ロボティクス、デジタル製造、持続可能性分析などの専門知識を持つ個人請負業者に頼るようになってきている。これらの労働者は、多くの場合プロジェクト単位で専門スキルを業界にもたすため、柔軟な勤務形態を求める雇用者と熟練した専門家の双方にとって、ギグ・ワークは魅力的なソリューションとなっている[87]。

経済や労働力の動向もギグ・ワークの拡大に寄与している。正社員の賃金と福利厚生コストの上昇により、製造業はより柔軟な財務基盤を提供する代替的な労働力モデルを模索している。COVID-19パンデミックはリモートワークや柔軟な勤務形態の採用を加速させ、自律性とワークライフバランスを求める労働者にとってギグ・ワークをより魅力的なものにしている。デジタル・プラットフォームとAIを駆使した人材派遣ツールはこのシフトをさらに促進し、企業が独立した労働者と短期的な仕事の機会を効率的にマッチングすることを可能にしている[90]。

ギグ・ワーク導入の動向

米国製造業におけるギグ・ワーカーの割合は、過去 10 年間で着実に増加している。調査によると、現在、大企業の労働者の 6 人に 1 人がギグ・ワーカーであり、一部の製造分野では、その割合はさらに高くなっている。2010 年から 2019 年にかけて、従来型企业におけるギグ・ワーカーの割合は 14.2%から 16.4%に増加し、この増加傾向は今後も続くことが予想される。2025 年までには、製造業における雇用慣行の根本的な変化を反映し、製造業における役割の 20%がギグ・ワーカーによって満たされる可能性がある[89]。

製造業におけるギグ・ワークの性質も進化している。派遣労働者が一般的に低スキルで反復的な仕事を割り当てられていた過去とは異なり、今日のギグ・ワークには高度に専門化された専門家が含まれている。ロボット技術者、データアナリスト、AI エンジニアなどは、製造業のイノベーションに貢献する独立系労働者の仲間入りをしつつある。これらの労働者は多くの場合、高度な学位と新興テクノロジーに関する豊富な経験を持っているため、メーカーは長期雇用契約を結ぶことなく、彼らの専門知識を活用することができる。

企業はまた、ギグ・ワーカーをより効果的に統合するために、新たな労働力マネジメント戦略を採用している。オンライン人材マーケットプレイスやデジタル人材派遣プラットフォームは、採用プロセスを効率化し、メーカーが契約労働者を迅速に特定し、雇用し、管理することを可能にしている。AI を活用した人員計画ツールは、労働需要を予測し、スケジューリングを最適化し、ギグ・ワーカーを効率的に配置するために活用されている。また、多くのメーカーが柔軟な人材配置モデルに対応するため、職務の役割を再構築し、正社員とオンデマンド人材を融合させ、よりダイナミックで即応性の高い労働力を生み出している。

このような利点があるにもかかわらず、ギグ・ワーカーを製造業務に統合するにはいくつかの課題がある。大きな懸念事項の一つは、人材管理とコンプライアンスである。多くの企業では、臨時雇用者向けの体系的な人事方針が整備されていないことが原因である。正社員とは異なり、ギグ・ワーカーは従来の福利厚生制度の対象外であることが多く、法的および倫理的な懸念につながる可能性がある。また、企業は、独立請負業者を対象とする複雑な労働法にも精通し、規制遵守を確保しつつ、業務の柔軟性を維持する必要がある[87]。

もう一つの課題は、知識の保持とトレーニングである。ギグ・ワーカーの離職率が高い場合、組織的な知識が失われる可能性があり、企業は生産プロセスの一貫性を維持することが難しくなる。従来の従業員は大規模な研修プログラムを受けることが多いが、個人請負業者は同様のリソースを利用できない場合がある。適切なトレーニングが行われないと、スキルのミスマッチが発生し、効率性と製品の品質に影響を及ぼす可能性がある[87]。

文化的・組織的な抵抗も、ギグ・ワークの普及を阻む障害となっている。製造業の中には、職場の結束や生産性の低下を恐れて、臨時的な雇用に躊躇している企業もある。また、長期雇用者や労働組合は、雇用の安定や従来の雇用待遇が損なわれることへの懸念を表明している。これらの課題を克服するためには、労働力の安定性を損なうことなくギグ・ワークを統合するバランスの取れたアプローチが必要である[87][89]。

ギグ・ワークの展望

ギグ・エコノミーが拡大を続ける中、製造業は競争力を維持するために人材戦略を適応させる必要がある。企業はギグ・ワーカー専用のパイプラインを開発し、専門スキルへのアクセスを確保することで、オンデマンド人材プールの利用が増加すると予想される。ワークフォース・アナリティクスと AI を活用した人材派遣ソリューションが、労務管理の最適化でより大きな役割を果たすようになり、企業は需要を予測し、ギグ・ワーカーをより効果的に配置できるようになる。

規制の変化もまた、製造業におけるギグ・ワークのあり方を大きく変える可能性がある。政策立案者は、独立請負人の地位を再定義する可能性のある新たな労働法を検討しており、ギグ・ワーカーに対する保護を強化すると同時に、雇用主にとっての新たな透明性を確立しようとしている。このような変化は、企業がどのようにギグ・ワークを構成するかに影響を与える可能性があり、柔軟性と労働者の権利のバランスをとる新しいモデルにつながる可能性がある[87]。

長期的には、製造業はフルタイム労働者とギグ・ワーカーをシームレスに融合させたハイブリッドな労働力モデルを採用する可能性が高い。クラウドベースのコラボレーションツールやバーチャルな製造環境は、この統合を促進し、独立した請負業者が生産計画、メンテナンス、品質管理にリモートで貢献することを可能にするだろう。この移行をうまく乗り切った企業は、変動する市場の需要や新たな業界トレンドに対応する能力が高まるため、競争上の優位性を獲得できるだろう[87]。

米国の製造業におけるギグ・ワークの台頭は、企業の労務管理および人材管理への取り組み方に大きな変化をもたらしている。慢性的な労働力不足、スキル要件の変化、そして DX のプレッシャーに直面している製造業は、重要な役割を担うギグ・ワーカーの活用をますます加速させている。労働力の統合、コンプライアンス、知識の保持といった課題は依然として残っている一方で、ギグ・ワークの戦略的活用は、柔軟性と効率性の向上への道筋となる。今後、革新的な労働力モデルを採用し、テクノロジーを活用してギグ・ワーカー管理を最適化するメーカーは、デジタル化とダイナミック化が進む製造業の現場で成功するために有利な立場になるだろう[87][88][89]。

4.3.3 次世代の労働力のスキルアップ、再スキル化、育成

ギグ・ワークに見られる動向とは裏腹に、米国は、インダストリー4.0 や持続可能性を重視した生産の需要に対応させるため、人材育成にも積極的に投資している。産学官が連携した強固な官民パートナーシップを通じて、製造業の労働力の未来を形作る様々な取り組みが進められている。マニファクチャリング USA、NIST MEP、IRA、CHIPS and Science Act などの主要プログラムは、イノベーションを推進し、生産性を向上させ、持続可能性を促進するために必要なスキルを労働者に身につけさせる上で中心的な役割を果たしている。この取り組みの最前線に位置するマニファクチャリング USA は、人材育成を新興技術に合致させ、米国の産業の持続可能性と国際競争力の維持を支えている。

先進製造業の人材開発におけるマニュファクチャリング USA の役割

17 の専門機関からなるマニュファクチャリング USA ネットワークは、ロボティクス、AI、積層造形、先端材料などの最先端の製造技術に焦点を当てている。業界主導の研究開発を実施することで、これらの機関は、ハイテク製造環境での運用、維持、イノベーションに不可欠なスキルを定義している。各機関は、変革的な分野に特化しており、業界のニーズに合わせた人材育成を行っている。

- **CESMII** : IoT 対応システム、リアルタイムのデータ分析、エネルギー効率の高いプロセスに関する研修を実施することで、スマート製造に焦点を当てている。
- **REMADE Institute** : リサイクル、再製造、循環型経済の実践を重視し、持続可能性を重視する製造業に従事する人材を育成する。
- **America Makes** : 積層造形に特化し、試作、製造、修理のための 3D プリンティング技術のスキルを労働者に提供する。

これらの機関は雇用主と直接協力し、労働者に高度製造業に必要なスキルを身につけさせるプログラムを開発している。米国の労働力がインダストリー4.0 においても競争力を維持できるよう、マニュファクチャリング USA は研修プログラムに技術革新を組み込んでいる。主な重点分野には以下が含まれるが、これらに限定されるものではない。

- **AI** : AI を高度な製造業に統合し、労働者に AI を活用したプロセス最適化、予知保全、スマートオートメーションのスキルを身につけさせる。
- **デジタル・ツインとスマート工場** : デジタル・ツインとスマート工場に関する技術を活用し、プロセス最適化、リアルタイム監視、廃棄物削減のための労働者のトレーニングを実施する。
- **持続可能性と循環型経済の実践** : ライフサイクル評価、リサイクル技術、資源効率の高い生産方法を労働者の訓練に取り入れ、米国の産業の持続可能性の目標に合致させる。
- **先端材料と積層造形** : 労働者に材料科学のイノベーションを身につけさせ、より軽く、より強く、より持続可能な材料の開発と使用を可能にする。

マニュファクチャリング USA は、連邦政府機関とのパートナーシップや産業界との連携を活用し、人材育成の効果を最大化する。米国国防省、エネルギー省、商務省が資金を提供するプログラムにより、クリーン・エネルギー、脱炭素化、産業のレジリエンスといった国家的優先課題が人材育成に反映されるよう支援している。さらに、製造業との連携により、インターンシップ、共同教育プログラム、実地研修などを通じて、実社会でのスキル応用の機会を提供し、労働者がハイテク製造環境で実践的な経験を積めるようにしている。

先端製造業の人材開発における NIST MEP の役割

研究集約型のマニュファクチャリング USA とは異なり、NIST MEP は中小製造業者に対す

る実践的な労働力ソリューションの提供に重点を置いている。中小製造業者と直接協力してスキルのギャップを特定することにより、MEP 全国ネットワークは、以下を重視したオーダーメイドの研修プログラムを提供している。

- リーン生産方式
- 品質保証と工程管理
- エネルギー効率とコストの最適化

これらの実地研修プログラムにより、中小製造業者の従業員は、生産効率と事業のレジリエンスを向上させる基礎的スキルを確実に身につけることができる。さらに MEP は、従業員が自動化、ロボティクス、データ分析などの役割に移行できるよう、リスキリング・イニシアチブを支援し、中小製造業者がテクノロジー主導型経済で競争できるようにしている。マニファクチャリング USA が AI や積層造形などのハイテク・ソリューションに重点を置いているのに対し、MEP は中小製造業者がこれらの技術を段階的に統合できるように支援している。DX、データ管理、サイバーセキュリティのトレーニングを提供することで、MEP は中小製造業者が生産工程を中断することなくインダストリー4.0 技術を導入できるよう支援する。この支援は、規模の大小にかかわらず、すべての製造業者がデジタル化と自動化の恩恵を受けられるようにするために不可欠である。

この観点から、米国では製造業における協働ロボットの導入も拡大している（付録 B）。

マニファクチャリング USA と NIST MEP の補完的役割

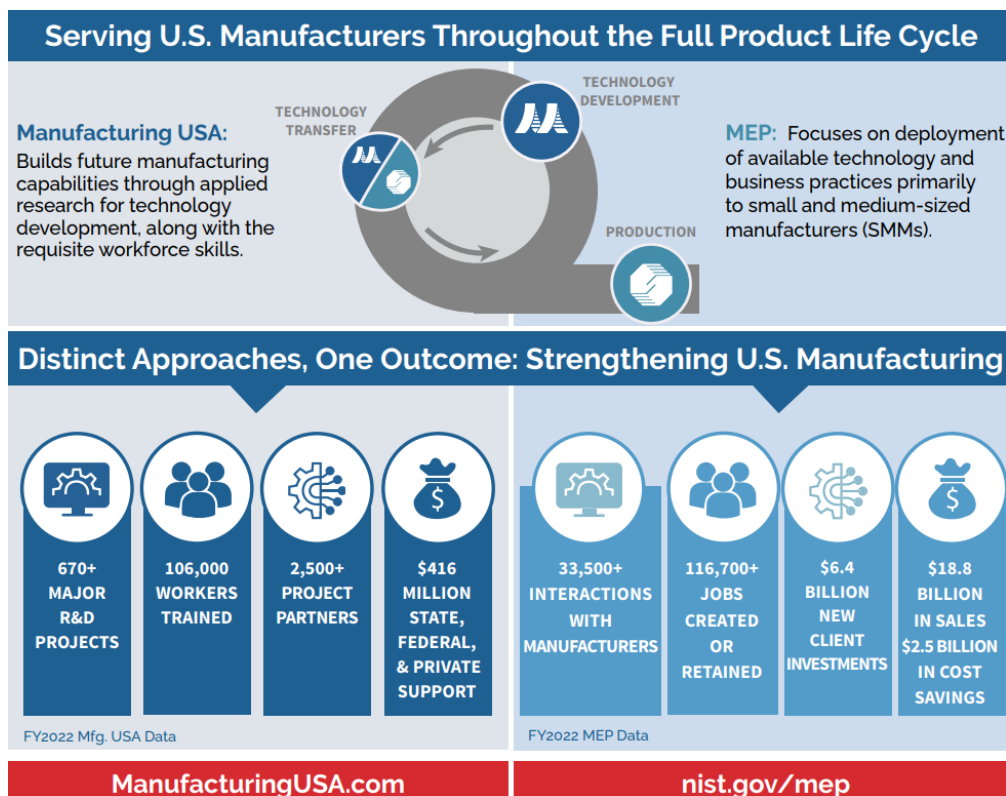


図 39 - マニファクチャリング USA®と MEP による米国製造業の強化[91]

マニュファクチャリング USA と NIST MEP は、米国の人材育成を進める上で補完的な役割を果たしている。

- マニュファクチャリング USA は、AI、デジタル・ツイン、積層造形などの先端技術に関する最先端の人材育成に重点を置いている。
- NIST MEP は、中小製造業者が大きな混乱なく徐々にインダストリー4.0 のイノベーションを導入できるよう、実践的で費用対効果の高いトレーニングを提供している。

マニュファクチャリング USA がイノベーションを推進し、NIST MEP がスケラブルで実用的な実装を可能にする。この相乗効果により、ハイテクスペシャリストから現場の技術者に至るまで、製造業の労働力全体が産業の進歩の恩恵を受けることができる。

これらの取り組みの相乗効果は、人材育成における官民パートナーシップの有効性を示している。例えば、CHIPS and Science Act の資金援助は、半導体製造に特化したマニュファクチャリング USA の新設を支援し、これらの機関は NIST MEP と連携して中小製造業者に的を絞った訓練と支援を提供する。このような統合的アプローチにより、製造エコシステム全体のニーズに対応した包括的な人材育成を実現しようとしている。

学術界、産業界、政府の強みを活用することで、米国は製造業の労働力を将来の課題に備えて大きく前進している。こうした協力的な取り組みは、製造業の生産性を向上させるだけでなく、産業の持続可能性を促進し、米国が世界市場における競争力を維持するための基盤を築くことにもつながる。

4.4 欧州の活動

4.4.1 スキルの置き換え需要と雇用の変化

欧州では、数十年にわたり、スキルの需要の大部分は、定年退職やその他の理由で労働市場を離れたたり、職を転々としたりすることによって生じる置き換え需要である[93]。求人に占める置き換え需要の割合の増加は、人口と労働力の高齢化を反映したものであり、いくつかの加盟国では深刻な課題となっている。2035 年に向けて、図 40 に示すように、あらゆる分野で置き換え需要が求人の大部分を占めると予想される。農業と鉱業・採石業といった雇用が縮小すると予想される分野でも求人数はプラスに推移している。これは、置き換え需要がこれらの分野で予測される雇用減少を補って余りあるほど大きいためである。

置き換え需要は、高齢化による労働市場の空洞化だけを反映するものではないため、置き換え需要を満たすための対策は、置き換え需要を促進する他の理由も考慮する必要がある。例えば、グリーン・トランジションは、エネルギー分野の労働者の職種、場合によっては分野レベルでの転換の原動力になると予想される。こうした変化の現状と将来予測を地域レベルおよび分野レベルで分析することは、トレーニングの機会の訓練提供にとどまらない、的を絞った政策実施アプローチの形成に役立つだろう。

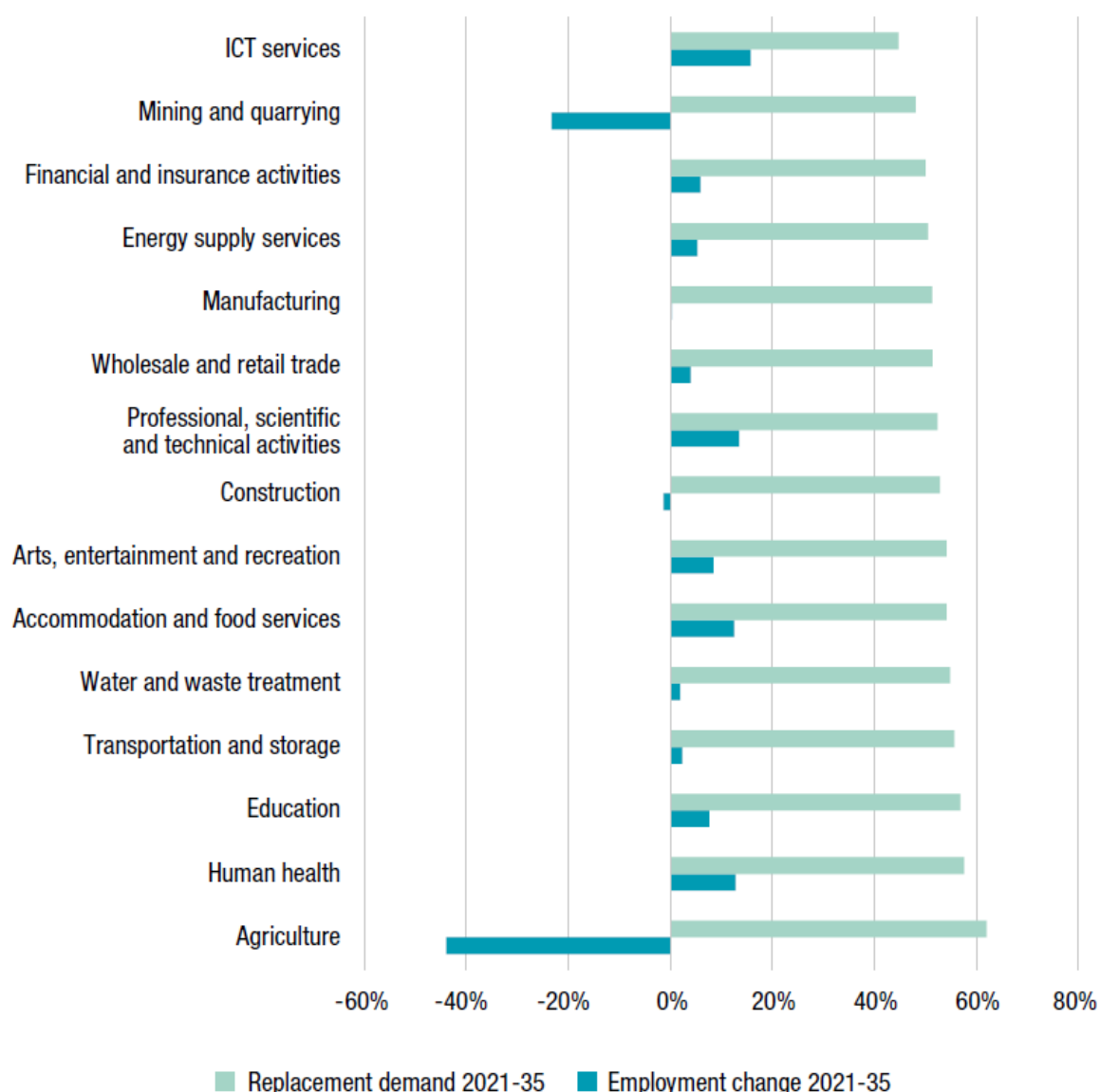


図 40 - スキルの置き換え需要と雇用の変化（2021-35 年、欧州加盟国） [93]

4.4.2 デジタル・プラットフォーム労働者に対する政策

プラットフォーム・ワークとは、組織や個人がオンライン・プラットフォームを利用して他の組織や個人にアクセスして特定の問題を解決したり、支払いと引き換えに特定のサービスを提供したりする雇用形態であり、ギグ・ワークもこれに含まれる[92]。プラットフォーム・ワークは増加の一途をたどっており、欧州では数百のデジタル・プラットフォームが活動し、数百万人の労働者がこれで働くことで何らかの収入を得ている[94]。COVID-19 パンデミックを経て、デジタル・プラットフォーム労働者に対する欧州の政策は発展してきた。

2019 年の欧州議会の声明によると、デジタル・プラットフォームから仕事の機会を得ることは、労働者の権利に重大なリスクをもたらすとしている。2019 年当時は、これらのプラットフォームを通じてサービスを提供する人々は、標準的な労働契約によって保護されてい

いことが多く、そのためより脆弱になっているとされ、欧州プラットフォーム労働者指令によってこれを変えようとしている。欧州議会のメンバーは、すべての従業員に最低限の権利を導入する新しい規則を採択し、非典型的な契約やギグ・エコノミー労働者のような非標準的な仕事に従事する最も弱い立場の労働者に新たな権利を付与した。規則には、より透明で予測可能な労働条件、無料の義務教育、労働時間や試用期間の制限を確保することで労働者を保護する措置が盛り込まれた。

2021年の欧州委員会の分析によると、欧州域内では、国際的企業から小規模な国や地域のスタートアップ企業まで500を超えるデジタル労働プラットフォームが活動している。COVID-19パンデミックによって加速されたデジタルへの転換は、これらのプラットフォームの収益は過去5年間で約500%と驚異的に成長した。欧州では、デジタル・プラットフォームは2,800万人以上を雇用し、2025年までに4,300万人に達すると予想されている。一方で、プラットフォームで働く労働者のほとんどは正式には自営業であるが、主に現場でサービスを提供する約550万人が誤って分類されている可能性がある。欧州諸国ではすでに100件以上の裁判所の判決がプラットフォーム労働者の雇用状況を扱っており、そのほとんどは独立請負業者を労働者に、「ギグ」プラットフォームを雇用主に再分類し、その結果として労働者に対する法的責任を問うものである。

2024年3月、欧州議会の雇用・社会問題委員会は、プラットフォーム労働者の労働条件改善を目指す新法案に関する政治合意を承認した[95]。同年2月に欧州議会と理事会が合意した新規則は、プラットフォーム労働者の雇用形態が正しく分類されるようにし、偽装自営業を是正することを目的としている。また、欧州で初めて、職場におけるアルゴリズム管理とAIの使用も規制している。同指令は、プラットフォームとプラットフォーム労働者との間の力の不均衡を是正することを目的として、欧州諸国に対し、国家レベルで雇用の反証可能な法的推定を確立することを義務付けている。立証責任はプラットフォーム側にあり、雇用関係がないことを証明するのはプラットフォーム側である。新たな規則は、アルゴリズムや自動意思決定システムによる決定に基づいて、プラットフォーム業務に従事する者を解雇または解雇されることがないようにするものである。また、この指令は、アルゴリズムがどのように機能するのか、労働者の行動が自動システムによる決定にどのように影響するのかを、労働者やその代理人に知らせることをプラットフォームに義務付けることで、透明性を向上させている。

4.4.3 欧州における人的資本の課題

世界的な人材獲得競争と欧州における生産年齢人口の減少という状況の中で、欧州の競争力は将来のスキルに依存しており、経済的・社会的・地域的な結束に貢献している[96]。人的資本は、現在の地政学的状況における備えと安全保障を促進するためにも不可欠である。

欧州が競争力を持ち、将来に備えるためには、欧州競争力コンパス[97]で強調されているように、学習、仕事、生活において成功するために必要なスキルや能力を持つ市民を支援し、備えさせる必要がある。

ドラギ報告書[98]、レッタ報告書[99]、ニイニスト報告書[100][101]で強調されているよう

に、スキル不足とギャップ、変革スピードの不足、そして断片的で非効率的なガバナンスが欧州の競争力を妨げている。これらは生産性向上とイノベーションの障壁となり、脱炭素化とデジタル化への取り組みを阻害している。

欧州の教育・訓練制度は、経済の脱炭素化を進め、戦略的分野への依存度を減らすために必要な、急速な技術革新と変化するスキルに対応できていない。欧州は、特にクリーン・循環型技術、デジタル技術、航空宇宙、防衛のような戦略的部門において、STEM スキルを必要とするデジタルツールへの依存度が高まっている伝統的部門を含め、STEM 分野の熟練した人材の需要を満たすという課題に直面している。



図 41 - 技能同盟に関する主な数字[102]

我々は高度な資格を持つ専門家を輩出しているものの、その数は不足しており、ギャップを埋めるには至っていない。図 41 に示すように、欧州の中小企業の 5 社中 4 社近くが、必要なスキルセットを持つ労働者の確保に苦慮しており、特に AI、半導体、量子コンピューティングなどの画期的技術では、新興企業やスケールアップ企業が深刻な影響を受けている。こうした人材不足は、運輸、食品、エネルギーなどあらゆる分野に影響を及ぼし、経済成長を制限し、イノベーションを阻害している。また、15 歳の基礎学力の低下は、数学と理科の専門教師の不足と密接に関連しており、教師やトレーナーを確保し、これらの重要な分野における継続的な専門能力開発を通じて彼らをよりよく支援することが緊急に必要であることを浮き彫りにしている。また、若い世代のニーズと期待が進化するにつれ、仕事とイノベーションの変化に合わせて、教育と進路に関する新たなビジョンが必要になるかもしれない。

4.4.4 技能同盟

技能同盟は、欧州社会権の柱[96]に沿って、欧州のすべての人々が、居住地を問わず、確固たるスキル基盤を築き、生涯にわたるスキルアップとリスクリングに取り組むことができるようにすることを目指している。

その目標は、欧州の教育・訓練制度を支援し、背景や居住地に関わらず、すべての若者を含むすべての人々に、教育、生涯学習、質の高い雇用へのアクセス、そして移行期や危機を乗り越えるための平等な機会を提供することである。

第二の目標は、企業の競争力とレジリエンスを高め、雇用主、特に中小企業が持続可能な成長と質の高い雇用を創出するために必要なスキルを持つ人材を見つけやすくすることである。また、刻々と変化する課題や機会に適応できるよう、あらゆる世代の労働者のスキルアップと再教育に投資するよう企業に呼びかけている。同時に、企業、特に中小企業やスタートアップ企業・スケールアップ企業がこうした投資を実現するための適切なインセンティブと支援が必要であることも認識している。

最後に、技能同盟は、欧州のどこで取得されたかにかかわらず、スキルや資格が単一市場全体で透明化され、信頼され、認知されるように努め、個人が自由な移動の権利を行使できるようにするとともに、雇用主、特に中小企業が国境を越えて効果的に採用活動を可能とさせる。

図 42 に示すように、技能同盟の主要な柱は以下の通りである。

- 包括的な生涯学習アプローチによる強固な教育基盤を通じて、質の高い仕事と生活のためのスキルを育成する。
- 低・中程度のスキルを持つ人材を中心に、デジタル化とクリーンな移行をマスターする機敏な労働力のスキルアップと再教育を促進する。
- 欧州域内の自由な人の移動を通じてスキルを循環させ、単一市場の潜在能力を最大限に引き出す。
- 優秀な人材を惹きつけ、育成し、維持する。



図 42 - 技能同盟 [96]

図 42 に示すように、技能同盟の主要な構成要素は以下の通りである。

質の高い生活と雇用のためのスキルの構築

スキルの構築・教育・訓練は良質な雇用の創出と生活の向上に不可欠である。技能同盟は以下を実施する。

- すべての若者が読解力、数学、科学、デジタルのスキルを身につけられるよう、基礎スキル支援制度を試行する。
- STEM 教育の戦略的計画に基づき、STEM スキルの向上、STEM 関連キャリアを促進、女性の参加促進、デジタル技術やクリーン技術への移行に備える。
- 欧州の新しい職業教育訓練（VET）戦略を導入し、職業教育訓練をより魅力的、革新的、包括的なものにする。

定期的なスキルアップと再スキルアップ

変化する経済に対応し、生涯学習を保証するために、新たなスキルの習得が人々の職業生活の日常的な一部となるべきである。

欧州委員会は以下の取り組みを行う。

- 柔軟な学習ソリューションとして、マイクロクレデンシャルの利用拡大を提案する。
- 戦略的分野において、より多くの労働者が新たなスキルを習得できるよう、スキル協定を強化する。
- 失業の危機に瀕している労働者に新たなスキルを習得する機会を提供するため、スキル保証制度を試行する。

欧州は、グリーン・トランジションとクリーン・インダストリアル・ディールに必要なスキルを企業に提供するため、欧州スキルアカデミーの展開を支援する。

労働者の自由な移動の支援

欧州全域でスキルを循環させることにより、単一市場の潜在力を最大限に引き出す。技能同盟は以下に重点を置いている。

- スキルのポータビリティ・イニシアチブを立ち上げ、スキルや資格のポータビリティを強化する。
- 欧州全域での革新的な共同学習プログラムの開発を促進するため、欧州の学位取得を目指す。
- 欧州の新しい職業教育訓練（VET）の卒業証書
- 欧州の大学との提携および職業卓越センターの強化
- 教員と生徒の流動性を高めるための欧州の学校間の提携

人材の確保、育成、維持

欧州は、イノベーション、成長、競争力にとって不可欠な優秀な人材を惹きつけ、育成し、確保しなければならない。

欧州委員会は以下を行う。

- 特にスキル不足に直面している職種について、あらゆるスキルレベルの欧州域外からの求職者への採用を支援する欧州人材プールを設置する。
- 優秀な学生、熟練労働者、研究者が欧州に入国しやすくするためのビザ戦略を提示する。
- マリー・スクウォッドフスカ・キュリー・アクションに基づき「Choose Europe」イニシアチブを立ち上げ、優秀な人材の誘致し、確保する。

技能同盟は、競争力に関する共通のビジョンのもとに、教育、訓練、雇用政策を統合した新たなアプローチを提案している。今後の課題は非常に大きく、加盟国、社会的パートナー、産業界、大学、学校など、すべての関係者が集団責任を負い、スキルの需要と供給の両面（スキル開発、認定、労働条件との関連性、人口動態、企業慣行など）に取り組む政府全体のアプローチを強化することによってのみ、この課題に取り組むことができる。

4.5 地域間の類似点と相違点

本章では、日本、米国、欧州における人材戦略の取り組みについてみてきた。

3 地域とも、先進国特有のいわゆる人口ボーナスによる生産性の高成長時代は既に過ぎ去り、社会情勢の変化に伴う労働需給バランスの確保が共通の課題であると認識している。つまり、3 地域は、規制やルール、文化的背景の違いはあるものの、社会の成熟度という点では共通点が多く、人材という観点からはデジタル化を含むテクノロジーの進化が将来の労働力を大きく変容させるという共通認識がある。

特に、HMI の観点からは、機械への入力や機械から出力される情報のチェックなどの手作業は減少していくため、今後需要の増加が見込まれるデジタル化関連の職種への再教育が共通の課題となっている。さらに、デジタル・プラットフォーム上で利用が進むギグ・ワークは、社会情勢の変化に伴う労働力の増大という点で、3 地域とも有用であると認識している。

このように、問題意識や産学官連携への意欲は各地域に共通しているものの、具体的な施策に対する優先順位やアプローチは、それぞれの経済状況を鑑みて地域ごとに異なっている。

日本では、リスキングやギグ・ワークの拡大に先立ち、1980 年代までの経済成長に伴う終身雇用や年功序列賃金といった伝統的な雇用制度を見直し、人材の流動性を高めることが

重視されている。米国では、専門職を含む幅広い職種で人材の流動性が比較的高く、官民連携や連邦政府の取り組みとして、人材の流動性を前提としたデジタル化による労働力転換政策が進められている。欧州では、中小企業のDXを支援するため、産学官連携による関係構築や欧州域内の加盟国において必要なリソースへのアクセスを容易にする仕組みづくりが進められている。

以上のように、各地域が共通の問題意識を持ち、産学官が連携して産業の持続可能性に取り組もうとする姿勢は見られるが、具体的な施策の優先順位やアプローチについては、地域の経済状況等を考慮し、地域ごとに独自のものがあることがわかった。このような共通点と相違点を相互に理解し、地球規模での産業の持続可能性の実現に向けた国際協力を推進することが重要である。次章では、エネルギー安全保障、脱炭素化、廃棄物に関する話題を掘り下げ、国際協力の可能性を探っていく。

5 エネルギー／脱炭素／廃棄物問題

5.1 はじめに

COVID-19 パンデミックをきっかけに、世界情勢は劇的に変化し、エネルギー安全保障と持続可能性の重要性が浮き彫りになった。また 2022 年のロシアによるウクライナ侵攻は、こうした課題をさらに浮き彫りにし、各国にエネルギー戦略を見直し、脱炭素化目標達成における原子力発電の役割を再検討するようになった。

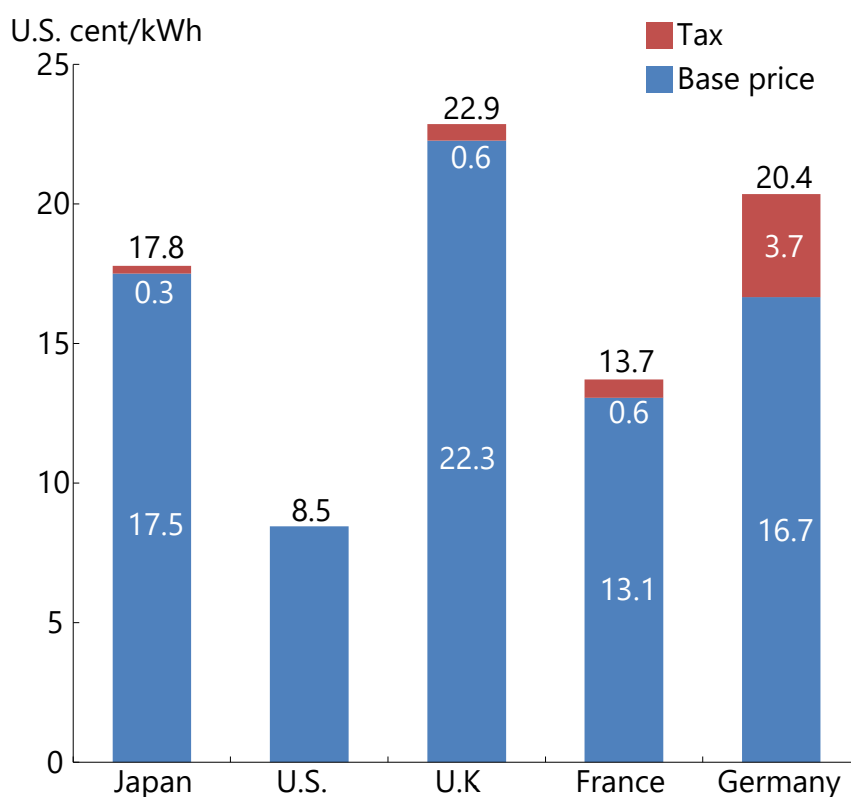


図 43 - 産業用途の電気料金
(2022 年、エネルギー白書 2024 年、資源エネルギー庁、経産省) [103]

図 43 の産業用電気料金の国別比較を見ると、米国が圧倒的に安いのが、日本とドイツは似た状況にある[103]。産業の持続可能性という観点からみると、エネルギーコストは地域の製造業振興に直結しており、各国で様々な対策が講じられている。

また、産業の持続可能性とプラネタリー・バウンダリーの関係という観点からみると、例えば半導体製造や鉄鋼製造は大量のエネルギーを消費する産業であるものの人間社会を支える基盤であり、これらの産業における脱炭素化・省エネルギー化は、産業の持続可能性とプラネタリー・バウンダリーの高次元で両立させる可能性を秘めている。

このような観点から、日米欧では、エネルギー、ものづくり、持続可能な人間社会の視点で、どのような取り組みがなされ、どのような課題に直面しているのだろうか。以下の章では、この点を掘り下げ、国際協力の可能性を探っていく。

5.2 日本の活動

5.2.1 グリーン成長戦略

2020年10月、日本政府は「2050年までのカーボン・ニュートラル」の実現を宣言した[104]。2021年4月には2013年度比で温室効果ガス排出量を46%削減することを目指すとともに、排出量50%削減という高い目標の達成に向けて引き続き努力するとして、2030年度の温室効果ガス削減目標を新たに設定する方針を発表した[105]。

これらの方針に基づき、2050年までのカーボン・ニュートラル達成に向けた戦略を示すため、さまざまな将来シナリオが検討されている[106]。例えば、以下のような指標が示されている。

- 2050年の発電量の約50～60%を、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなどの再生可能エネルギーで賄う。
- 約10%は水素と燃料アンモニア発電でカバーする。
- 約30～40%は、原子力発電とCO2回収を伴う火力発電でカバーする。

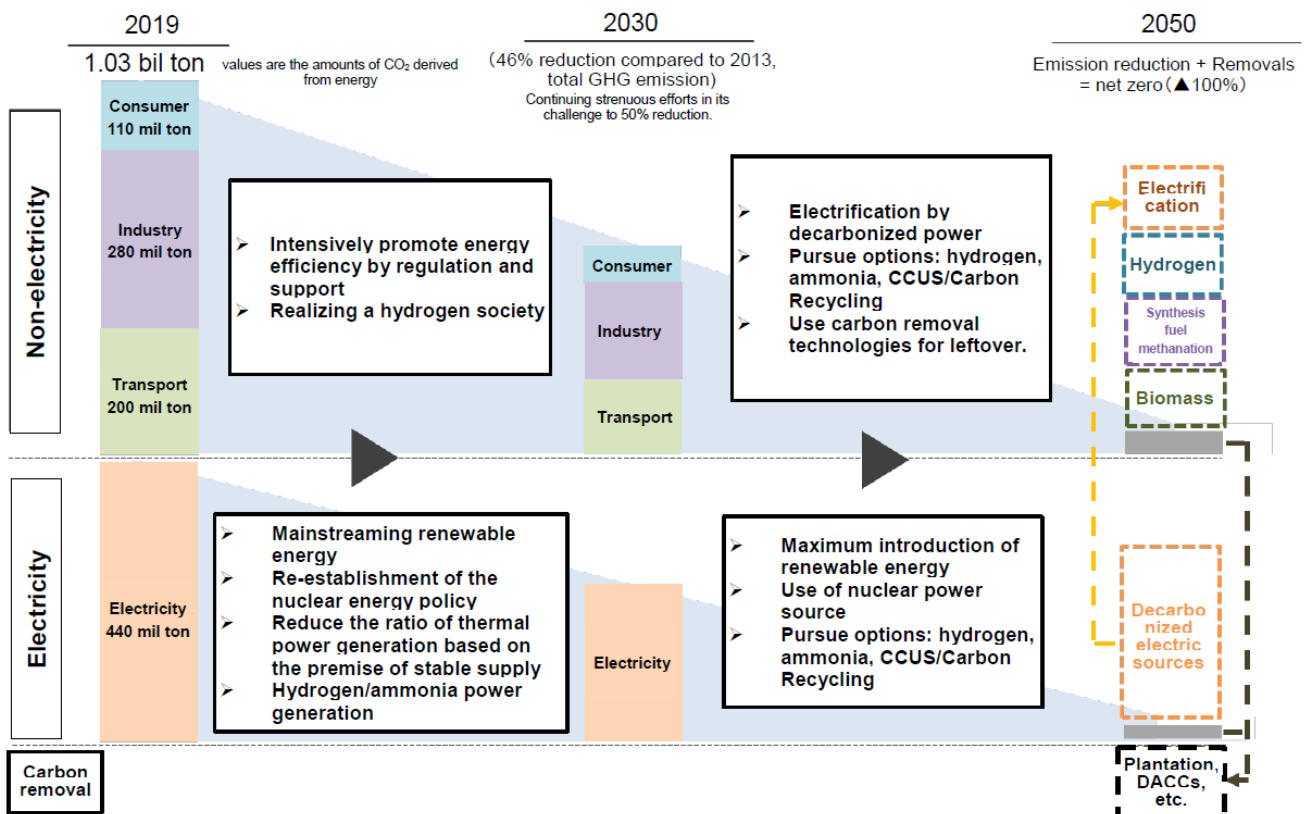


図 44 - 日本の 2030 年と 2050 年の温室効果ガス削減目標[106]

これらの指標を達成するために、各電源は自然条件、社会的制約、技術的課題などの課題を明らかにして、その解決策を検討している。今後、電化の進展により電力需要が3~4割程度増加することが見込まれる課題に対しては、原子力、水素・アンモニア、CCUS、カーボン・リサイクル、再生可能エネルギーの最大活用など、脱炭素化のためのあらゆる選択肢を、政策オプションを絞ることなく検討している。図44は、2030年の中期目標を考慮し、目標達成のためのこれらの選択肢を整理したものである。

この政策の進捗は、2022年度までに温室効果ガス排出量を2013年度比で22.9%削減するという中間目標に対して、着実に進捗していると報告されている。これは、3E+S（安全性に基づくエネルギー供給、経済効率、環境）の達成・維持を目指す日本のエネルギー政策と整合していると評価されている。

さらにこの政策は、産業界とともに経済成長と環境保全の循環を生み出すことを目指している。図45に示すように、成長が期待される14の産業分野を特定し、産学官の力を結集した成長政策を検討している。

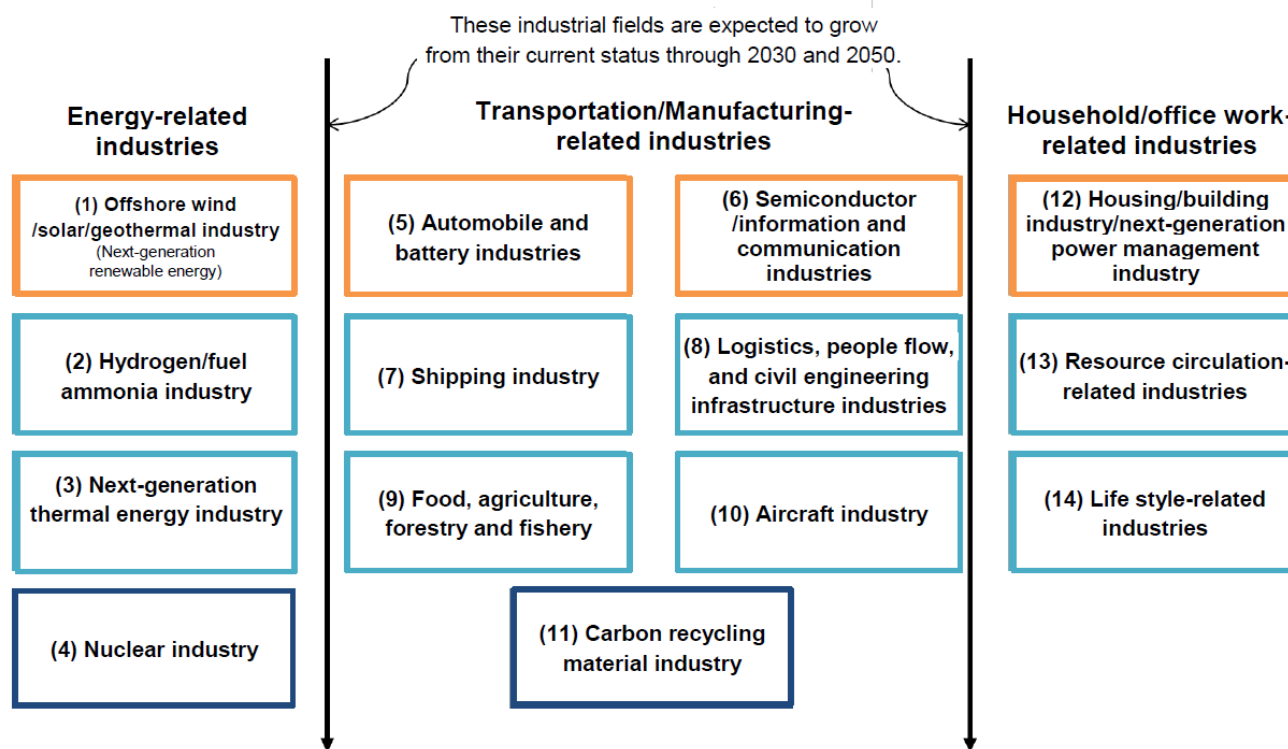


図45 - 日本のグリーン成長戦略によって成長が期待される産業分野[106]

5.2.2 グリーンイノベーション基金

2050年までにカーボン・ニュートラルを実現するため、経産省はNEDOの一部として2021年3月時点で2兆円規模の基金を創設し、グリーンイノベーション基金事業を開始した。これは、意欲的な目標を掲げる企業に対し、研究開発プロジェクトや実証事業、社会実装事業などを最長10年間継続的に支援するものである。事業規模に関して、2022年度第2次補正予

算で 3,000 億円、2023 年度当初予算で 4,564 億円が積み増しされ、総額 2 兆 7,564 億円となった (2024 年 11 月現在) [107][108]。

支援対象のプロフィールは以下の通りである。

- 従来の研究開発プロジェクトの平均規模 (200 億円) 以上とする。
- 政府による短期的な支援で十分なプロジェクトは対象外とする。
- 主な実施主体は、公的な実施プロセス全体を遂行できる企業またはその他の営利企業であること (中小企業やベンチャー企業の参加が奨励され、大学や研究機関の参加も期待される)。
- 政府からの委託に値する革新的かつ基礎的な研究開発要素を含むプロジェクトであること。

研究開発の成果を着実に社会実装につなげるため、経産省は企業経営者に対し、長期的な経営課題として粘り強く取り組む姿勢を求める。例えば、経産省は企業経営者に対し、応募時の長期経営戦略ビジョンの提出、分野別ワーキンググループへの出席と説明、取り組み状況を示すマネジメントシートの提出を求めている。さらに、こうした取り組みを求める仕組みとして、取り組み状況が不十分な場合には事業の中止や委託費の一部返還、目標の達成度合いに応じて国がより多く負担する制度 (インセンティブ措置) などを導入している。

プロジェクトには、政府からの委託に値する革新的かつ基礎的な研究開発要素が含まれている必要があり、現在、以下のようなプロジェクトが開始されている。

- 洋上風力発電のコスト削減
- 次世代太陽電池の開発
- 廃棄物および資源循環におけるカーボン・ニュートラルの達成
- 大規模水素サプライチェーンの確立
- 再生可能エネルギーを利用した水電解による水素製造
- 製鉄プロセスにおける水素利用
- 燃料アンモニアのサプライチェーンの確立
- CO₂ 等を利用したプラスチック原料製造技術の開発
- CO₂ 等を利用した燃料製造技術の開発
- CO₂ を利用したコンクリート・セメント製造技術の開発
- CO₂ 分離・回収等の技術開発
- 次世代蓄電池・モーターの開発
- 電気自動車省エネのための車載コンピューティング・シミュレーション技術開発
- スマートモビリティ社会の構築
- 次世代デジタルインフラの構築

- 次世代航空機の開発
- 次世代船舶の開発
- 農林水産業におけるマイナスエミッション技術の開発
- バイオマニュファクチャリング技術による CO2 を直接原料とした炭素循環の推進
- 製造業における熱プロセスの脱炭素化

5.2.3 循環型経済とマイクロプラスチック問題

日本では、エネルギーなどの資源を経済に供給する観点から、経済成長と環境保全の循環に取り組むとともに、経済活動から排出される廃棄物についても循環型社会の構築の取り組みとして進めている。

環境省は、「第4次循環型社会形成推進基本計画」（2018年6月閣議決定）の第2回進捗レビューの結果を踏まえ、2022年9月に、図46に示すような「サーキュラーエコノミー・ロードマップ」を公表した。これにより2050年までの温室効果ガス排出量のネット・ゼロを宣言した後、日本で初めて循環型経済への方向性を打ち出した[109]。

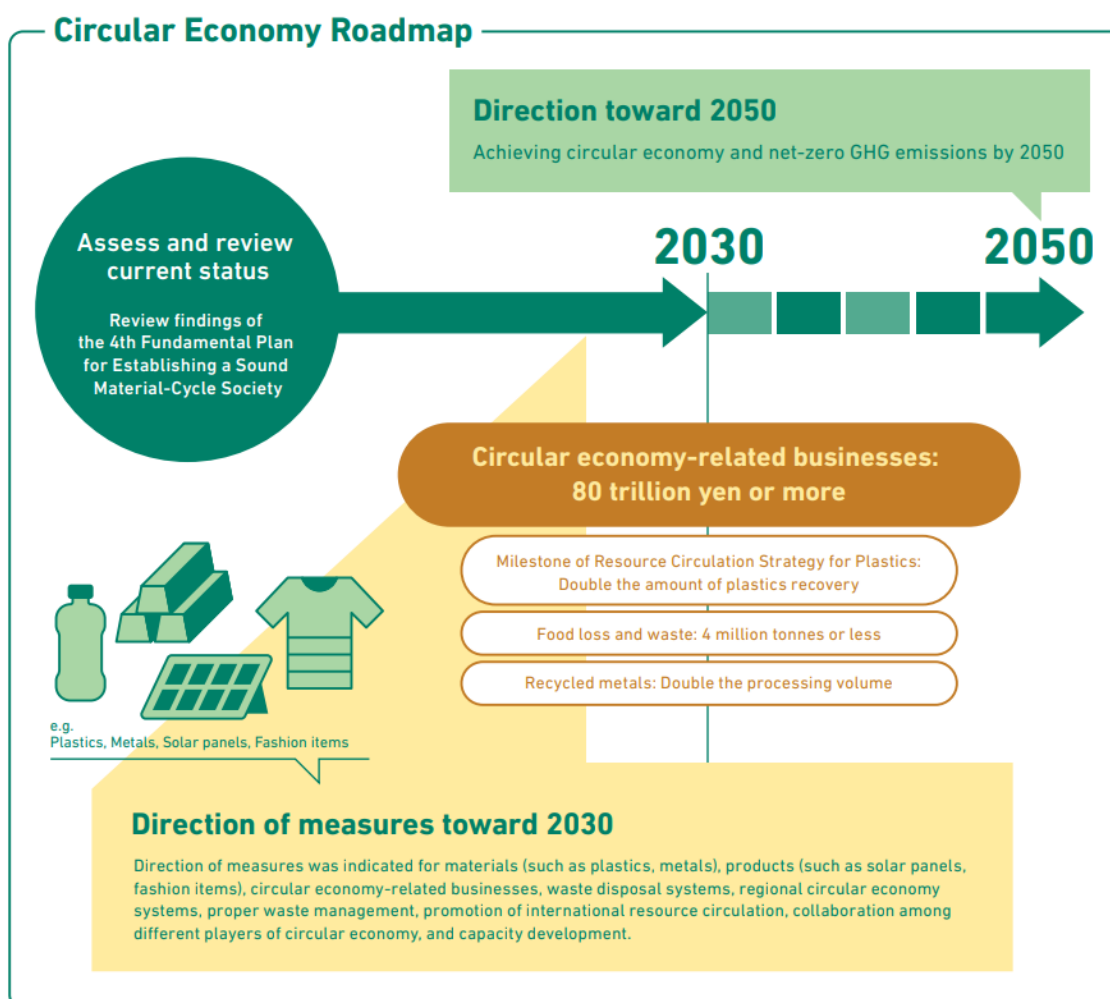


図 46 - 循環型経済ロードマップの概要[109]

サーキュラーエコノミー・ロードマップは、2050年に向けて目指すべき循環型経済の方向性と、2030年に向けて材料・製品等の分野で取り組むべき施策の方向性を示したものである。これに基づき、官民一体となってライフサイクルでの資源循環を基本とした脱炭素化を推進する。

日本の温室効果ガスインベントリを分析したところ、総排出量の約36%で資源循環が貢献できる分野に該当すると推定された。特に2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという目標達成の観点から、3R+再生可能エネルギーをはじめとする循環型経済への移行に向けた取り組みを推進する必要がある。

「3R+Renewable」とは、「循環型社会形成推進基本法」（2000年法律第110号）に定められた基本理念に基づき、3Rの普及と再生可能資源への代替を促進するための政策的アプローチである。炭素含有物質の焼却・埋め立て削減による温室効果ガス排出削減に加え、生産工程におけるエネルギー消費量の削減、バイオマス原料の利用拡大をはじめとするマテリアルの転換、加工・処理工程における再生可能エネルギーへの転換を推進することで、脱炭素社会の実現に広く貢献する基盤的なアプローチである。

家電リサイクル法（特定家電リサイクル法）は、循環型経済ロードマップが策定される10年以上も前に2001年に法律として制定され、社会実装された制度の一例である[110]。これは、一般家庭や事業所から廃棄される特定の家電製品から、有用な部品や資源を再資源化することで、廃棄物の排出量を削減することを目的としている。エアコン、テレビ、冷蔵庫・冷凍庫、洗濯機・衣類乾燥機などが対象で、製造業者、小売業者、排出事業者には処理が義務付けられている。

この分野において、プラスチック廃棄物は世界的な課題となっている。プラスチックの生産量は世界的に増加しており、1950年以降、累計83億トン以上のプラスチックが生産された。また、生産量の増加に伴い廃棄物も増加し、63億トンがゴミとして廃棄されていると言われている。現在のペースで進むと、2050年までに250億トンのプラスチック廃棄物が発生し、そのうち120億トン以上のプラスチックが埋め立て・自然界に廃棄されると予測されている。2021年の日本のプラスチック生産量は約1,045万トン、国内消費量は900万トン、プラスチック廃棄物の総排出量は824万トンだった。この廃棄物のうち、約25%がリサイクルされ、材料として再利用された。また、約63%がエネルギーとして回収された。

また、海洋に排出される海洋プラスチックごみは世界的な問題となっている。海洋プラスチックごみの量は膨大で、世界では年間約800万トンのプラスチックごみが海洋に排出されていると報告されている。近年、5mm以下の微細プラスチックは一般的にマイクロプラスチックと呼ばれ、海洋生態系への影響が懸念されている。マイクロプラスチックは、波や紫外線の影響でプラスチックごみが微細化したり、洗顔料や歯磨き粉のスクラブ剤として使用されたり、合成繊維の衣類の洗濯時にプラスチック粒子が混入したりすることで発生する。海洋プラスチックごみ問題については、2019年のG20大阪サミットにおいて、G20首脳間で2050年までにさらなる汚染をゼロにすることを目指す「大阪ブルーオーシャン・ビジョン」が共有された[111]。

この問題に対し、日本は以下のような法律や取り組みを実施している。

循環型社会形成推進基本法（2001年）

この法律は、天然資源の消費と環境負荷の削減を促進する。家電製品、自動車、包装材など特定の製品カテゴリについては、関連法に基づきリサイクルが義務付けられている。

プラスチック資源循環促進法（2022年）

特定の製品カテゴリに焦点を当てたこれまでの法律とは異なり、この法律はプラスチックのライフサイクル全体を対象とし、マテリアルリサイクルと再生可能プラスチックの利用に重点を置いている[112]。主な施策は以下の通りである：

- 3R+再生可能プラスチックの推進：廃棄物の削減、再利用、リサイクル、生分解性代替品の使用を促進する。
- レジ袋の有料化：使い捨て消費を抑制するため、小売業者はレジ袋の有料化を義務付けられる。
- マイルストーン目標：例えば、2030年までに使い捨てプラスチックを25%削減する。

一次マイクロプラスチックに関しては、日本ではマイクロビーズの使用は明確に禁止されていない。しかし、製造業者の自主的な努力により、マイクロビーズの使用は減少している。さらに2019年には、マイクロプラスチック問題に対応するため、海洋ごみ処理促進法が改正された。改正法では、事業者はマイクロビーズの使用を減らし、海洋環境への排出を最小限に抑えるよう努めるべきと規定されている[113]。

日本は、包括的なプラスチックのライフサイクル管理を実現する上で大きな課題に直面している。リサイクル率は高いものの、その多くは材料の再利用ではなくエネルギー回収であり、リサイクル技術のイノベーションが不可欠である[114]。さらに、マイクロプラスチック問題への対応には以下が必要である。

- 生分解性プラスチックのさらなる開発と普及。
- プラスチック消費削減への国民の意識向上と参加促進。

これらの社会的課題に対応するため、機械工学分野はマイクロプラスチック問題の解決において重要な役割を果たす。材料科学、廃棄物処理技術、製品設計におけるイノベーションは、プラスチック廃棄物の削減とリサイクル性の向上につながる可能性がある。持続可能な解決策を開発するためには、環境科学や政策立案との学際的な連携が不可欠である[115]。

5.2.4 経済安全保障と地域経済の活性化

エネルギーの大部分は産業、特に製造業の生産施設で消費される。生産施設の立地は、エネルギーコストの低い地域や国が好まれるが、経済安全保障の観点から、一部の製品群の生産設備は国内で維持・拡大されている。例えば、内閣府によると、日本では最近、南と北の地域で大規模な半導体ファウンドリーが立ち上げられている[116]。これらの施設周辺では、ファウンドリーのオペレーターやプロセスエンジニアのほか、装置メーカーや部品・材料サプラ

イヤーの雇用が創出され、サプライチェーンが強化されている。さらに、教育や住宅など他の産業分野でも追加投資が行われている。しかし、一般的には、生産設備における作業の自動化とデジタル化によって、必要な労働者数は減少する。

生成 AI 技術の市場導入が急速に進み、日本ではデータセンターの数が急増している。近年、データセンター数の増加はエネルギー消費量の増大の一因となっている。製造業においても、製品開発業務のデジタル化や市場での製品の使用状況分析には、計算資源とデータストレージが不可欠である。データセンターは、電力供給がより安定し、自然災害リスクが比較的低い東京や大阪などの都市部に集中している。近年、クラウド・コンピューティングの進展により、データセンターへの新規投資はこれらの地域に集中する傾向がさらに強まっている。しかし、これらの地域と他地域との格差を防ぐため、これらの地域の補完または代替する拠点として、南北に中核拠点を整備することが推進されている。さらに、経済産業省によると、地域エコシステムを支える基盤として、地方へのデータセンターの分散立地が進んでいる。

すなわち、生産施設の種類と立地、データセンターの立地は、日本のエネルギー利用や温室効果ガス排出量の特性に大きな影響を与えている。さらに、立地は、多様なスキルを持つ労働者の地理的分布にも影響する。このとき、再生可能エネルギー発電所、生産施設、データセンターの種類や立地に関するこれらの決定根拠は、国や地域の産業政策の背景、人口動態、教育水準、技術（研究開発の方向性を含む）などによって異なっている。図 47 は、国家目標達成のための大規模投資決定変数とその理由付けの関係をまとめたものである。

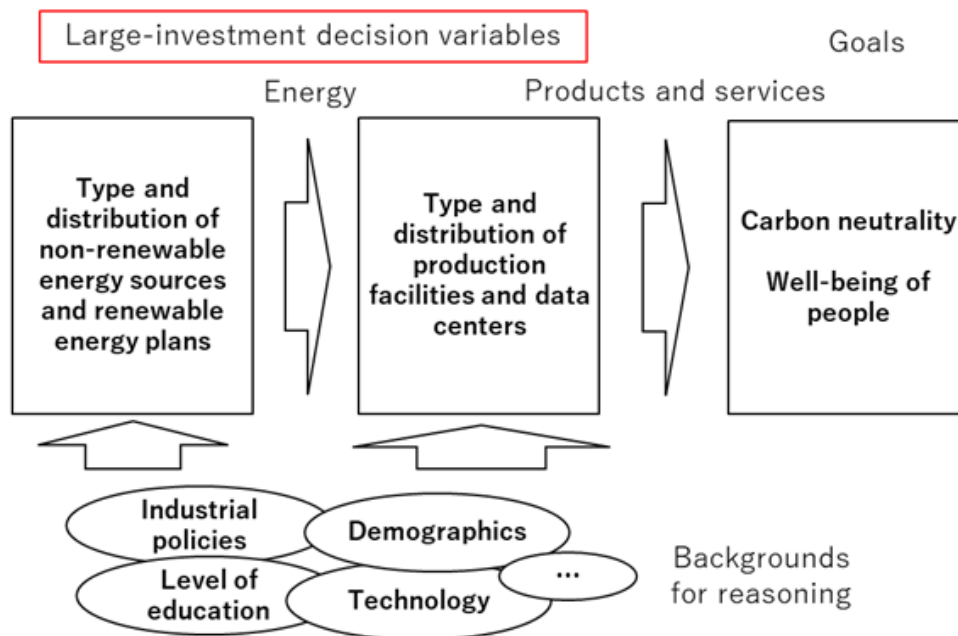


図 47 - 国家目標達成のための大型投資決定変数の推論[117]

5.2.5 デジタルインフラ

社会のデジタル化や AI のビジネス活用の拡大に伴い、エネルギー需要は爆発的に増加し、関連ビジネスが地域経済に与える影響も顕著になっている。このような背景から、日本政府はいくつかの施策を実施している。

例えば、半導体関連産業の製造拠点は日本の幅広い地域にあり、それぞれの地域経済で一定の割合を占めている。特に半導体を製造するデバイスメーカーは、図 48[118]に示すように、先端半導体では JASM（熊本県）、次世代半導体ではラピダス（北海道）に大規模な投資を行っている。これらの地域では、賃金が上昇し、半導体関連人材の育成に向けた地域的な取り組みが始まっており、今後、地域経済の中心となっていくことが期待されている。

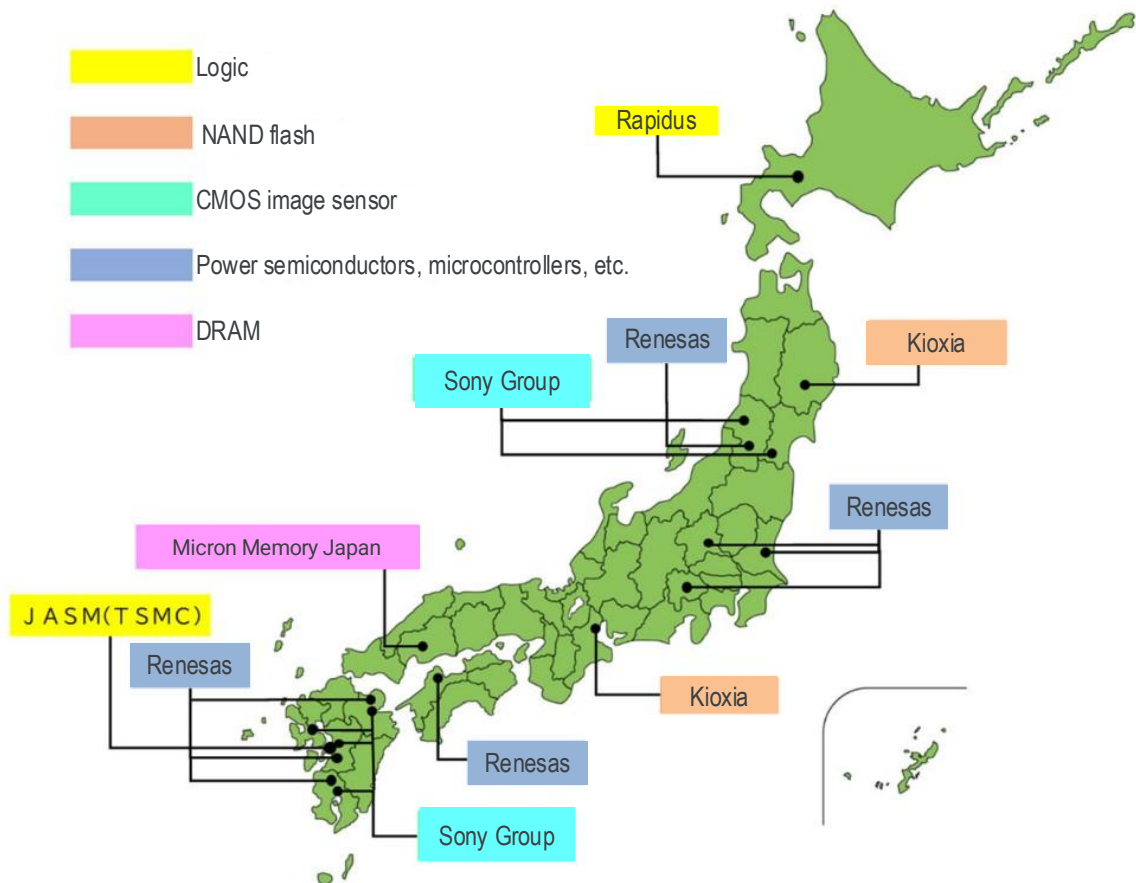


図 48 - 日本の主な半導体関連製造拠点[118]

地方においてこのような大規模な投資を実現するためには、関連技術の集積のみならず、電力や通信といったインフラ整備が不可欠である。こうした観点から、日本のデータセンターの立地をみると、東京圏と大阪圏において新規データセンター投資が加速していることがわかる。

これに対し、日本政府は、①自然災害時のレジリエンス強化、②地方における再生可能エネルギーの有効利用、③地方で生成されるデータの地産地消を可能にする通信ネットワークの

効率化、といった要件を踏まえ、データセンターをはじめとするデジタルインフラの分散化を促進する政策を推進している[119]。

具体的には、アジア太平洋地域や欧米諸国との信頼性の高い接続性を強化する観点から、日本のデジタル社会を支える基幹として、データセンターの整備を戦略的に検討している。当面は、北海道や九州などにおいて、東京や大阪を補完・代替する第3・第4の中核拠点の整備を進めるとともに、これらに接続する国際海底ケーブルのマルチルート化を推進している。

特に、情報処理と電力・通信インフラとの関係については、通信コストは電力の輸送コストに比べてはるかに安価であることから、データ処理結果のために需要地の近くにデータセンターを設置するよりも、電力インフラに近い場所にあるデータセンターでデータ処理を行い、通信ネットワークを介して処理結果を需要地へ伝送することが重要との認識を示している。現在、政府は、脱炭素電源を含む電力の地産地消の観点から、データセンターの分散化を推進することがより重要であるとの認識を示している。

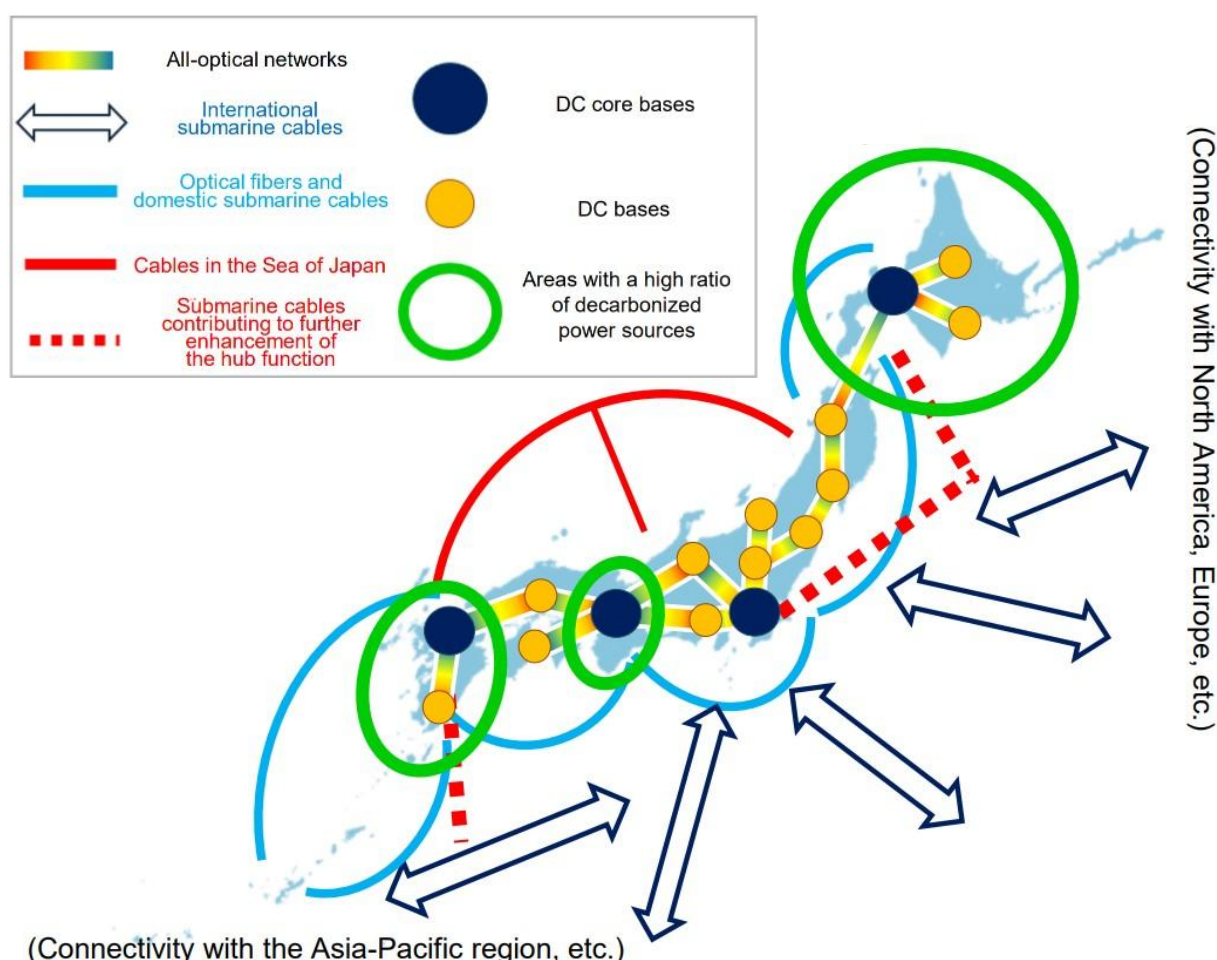


図 49 - 2030 年代の日本のデジタルインフラ概念図[119]

図中の DC はデータセンターを意味する

5.3 米国の取り組み

5.3.1 はじめに

米国の産業持続可能性へのアプローチは、国内の優先事項と世界的な圧力の両方を反映し、いくつかの明確な段階を経て進化してきた。21世紀初頭の大部分において、その戦略は気候変動対策の義務付けと排出削減目標を中心に構築され、エネルギー政策法（2005年）、アメリカ競争法（2007年、2010年）、超党派インフラ法（2021年）、CHIPS および科学法（2022年）、インフレ抑制法（2022年）といった主要法案によって支えられてきた。これらの取り組みは、再生可能エネルギーの導入、クリーン・エネルギーへのインセンティブ、産業の国内回帰、そして大規模なインフラ投資の基盤を築いた。また、米国の産業競争力を環境目標と整合させるための最初の体系的な試みを確立した。

しかし、2020年代半ばまでに、この規制重視、気候変動中心のモデルでは、産業の持続可能性に関するあらゆる課題に対処するには不十分であることが明らかになった。米国の産業部門は依然としてエネルギー集約度が高く、国内エネルギー消費量の約3分の1を占めていた。再生可能エネルギーと原子力発電の成長にもかかわらず、化石燃料への依存は依然として続いていた。同時に、データセンターやAIコンピューティングの台頭、半導体や電池の国内回帰、輸送機関や建物の電化といった世界経済の構造変化が、既存の枠組みでは十分に予測できなかった形で需要を再構築し始めた。

これらの変化に拍車をかけ、COVID-19パンデミック、世界的なサプライチェーンの混乱、地政学的緊張によって引き起こされたエネルギー危機といった外的ショックが、米国のエネルギー安全保障と産業のレジリエンスの両面における脆弱性を浮き彫りにした。政策立案者や産業界のリーダーたちは、持続可能性はもはや炭素会計のみで定義できるものではないことを認識した。むしろ、環境責任とエネルギーの豊富さ、競争力、そしてイノベーション能力のバランスをとる統合的な枠組みが必要だった。

こうした背景から、米国は産業の持続可能性へのアプローチを拡大してきた。気候変動目標は依然として中心的な位置を占めるものの、脱炭素化をエネルギー安全保障と産業力と並んで位置付ける、実用的な優先順位モデルの中で追求されるようになった。この再構築は、以降の章、すなわち米国のエネルギー需要の現状（5.3.2章）、消費の原動力（5.3.3章）、2035年と2050年までの長期見通し（5.3.4章）、そして脱炭素化と循環型経済モデルの戦略的役割（5.3.5～5.3.7章）の基礎となっている。

5.3.2 米国のエネルギー需要の現状（2024～2026年）

米国のエネルギー需要の動向は、現政権の産業持続可能性の3つの相互に関連した柱である、エネルギー安全保障、経済活力、イノベーションへの道筋、を通して最もよく理解できる。それぞれの柱は、エネルギー需給バランスだけでなく、短期的な動向が米国の長期的なレジリエンスにどのように影響するかを解釈するための枠組みを示している。

エネルギー安全保障の観点から見ると、米国は依然として純エネルギー輸出国であり、2023年には生産量が消費量を約9京BTU上回り、国家のレジリエンスを支える豊かさを浮き彫りにしている。化石燃料、特に石油と天然ガスが依然として燃料構成の大部分を占めているものの、再生可能エネルギーと原子力は拡大しており、この柱を特徴づける「エネルギーは減らすのではなく、増やす」という理念を反映している。

経済活力の側面では、エネルギー需要の増加は、デジタルインフラ、産業の国内回帰、電化といった構造的な要因と密接に結びついている。ほぼ10年間横ばいだった電力消費は、2024年に約3%増加した。国際エネルギー機関(IEA)と米国エネルギー情報局(EIA)は、商業部門と工業部門を中心に2026年まで継続的な成長を予測している。これらの傾向は、エネルギーの豊富さが競争力、雇用創出、そして戦略的産業をオフショアリング圧力から守る基盤となっていることを浮き彫りにしている。

最後に、イノベーションの方向性は、短期的な需要の変化と技術革新がどのように交わるかを決定づけている。データセンターの急速な拡張、LNG輸出、輸送機関や建物の電化の導入はすべて、イノベーションが需要にどのように影響しているかを示している。米国の戦略は、規範的な義務付けによって管理されるのではなく、AI主導のグリッド最適化からSMRに至るまで、技術中立的なソリューションを重視し、市場のシグナルが効率化と脱炭素化の次の波を牽引することを可能にさせている。

このような背景から、2024~2026年における米国の短期的なエネルギー需要を以下では例示し、一次エネルギー、電力、天然ガス、液体燃料のバランスがどのようにエネルギー安全保障、経済活力、イノベーションへの方向性の3つの柱に組み込まれているかを述べる。

一次エネルギー：

米国の一次エネルギー総消費量は2024年に約9,400兆BTUとなり、2007年の過去最高値を依然として下回っている[120]。2023年には生産量が4年連続で消費量を上回り、生産量は10,283兆BTU、消費量は9,359兆BTUに達し、過去最高の黒字を記録し、米国の純輸出国としての地位を確固たるものにした。エネルギー構成は引き続き石油(約38%)と天然ガス(約36%)が主流で、原子力(約9%)と石炭(約7%)が依然として貢献しており、再生可能エネルギー(約9%)のシェアも増加している。このバランスは、化石燃料供給の堅調さと、「エネルギーを減らすのではなく増やす」というアプローチの一環として、再生可能エネルギーが着実かつ段階的に拡大していることを反映している。

電力需要：

米国の電力消費は、約10年にわたる需要の横ばい状態の後、2024年にはデータセンター、産業の国内回帰、輸送機関および建物の電化に牽引され、前年比約3%増加し、加速した。この上昇傾向は今後も続くと予想されており、IEAは2025年に約2.3%、2026年に約2.2%の成長を予測している。一方、EIAの短期見通しでは、この成長の大部分は商業部門(2025年+3.0%、2026年+4.5%)と産業部門(+2.0%、+3.5%)によるものとしている。これらの増加は、新たなデジタル・インフラとクリーン・テクノロジーによる製造業が米国の電力需要増加のダイナミクスを再構築し、長年の停滞を覆し、テキサス州や中部大西洋岸地域など需要増

加の地域的なホットスポットを生み出していることを浮き彫りにしている[121]。

天然ガス需要：

EIA の 2025 年 8 月の見通しによると、米国の天然ガス消費量は 2025 年に過去最高の約 914 億立方フィート/日に達する見込みである。その後、効率向上が産業部門および電力部門の伸びの一部を相殺するため、2026 年には若干減少する見込みである。需要増加の大部分は LNG 輸出に関連しており、2030 年まで年間約 10%の増加が見込まれている。これにより、天然ガスは国内のベースロード燃料として、また地政学的な輸出手段としての役割を強めている。天然ガスは引き続き発電を支えており（供給量の約 40%）、その役割はますます米国のエネルギー資源戦略と国際競争力に結びついている。

液体燃料需要：

液体燃料の短期的な需要は、効率向上、電動化、そしてマクロ経済の逆風によって圧迫されている。2025 年 5 月のガソリン消費量は、2020 年以来の最低の季節水準に落ち込み、車両の効率向上、EV 普及の増加、そして消費者行動の変化といった複合的な影響を浮き彫りにしている。石油は依然として最大のエネルギー源だが、その成長は鈍化しており、ジェット燃料と石油化学原料は道路燃料と比較して比較的堅調に推移している。これは、ガソリン需要の構造的な減少が他のセクターによって部分的に相殺され、液体燃料市場が徐々に均衡を取り戻しつつあることを示唆している。

5.3.3 需要曲線を動かす要因

データセンターと AI コンピューティング：

データセンターからの電力需要は、米国の電力システムにおいて最も大きな変革をもたらす原動力の一つとなっている。エネルギー省ローレンス・バークレー国立研究所(DOE/LBNL)の 2024 年のアセスメントによると、データセンターの負荷は過去 10 年間で 3 倍に増加しており、クラウドサービス、AI、高性能コンピューティングの爆発的な成長を背景に、2028 年までにさらに 2 倍あるいは 3 倍に増加する可能性がある。電力研究所(EPRI)と DOE の共同分析では、米国のデータセンターが米国の総電力の消費量に占める割合は、2023 年の約 4%から 2030 年までに最大 9%に増加すると予測されている。世界的に見ると、IEA はデータセンターの電力消費量が 2030 年までに 2 倍以上に増加すると予測しており、この傾向の国際的な側面を強調している。米国の予測では構造変化も強調されており、EIA の Annual Energy Outlook 2025 では、商業部門の電力に占める商業コンピューティングのシェアが 2024 年の約 8%から 2050 年までに 20%近くに増加すると予測されている[122][123][124]。

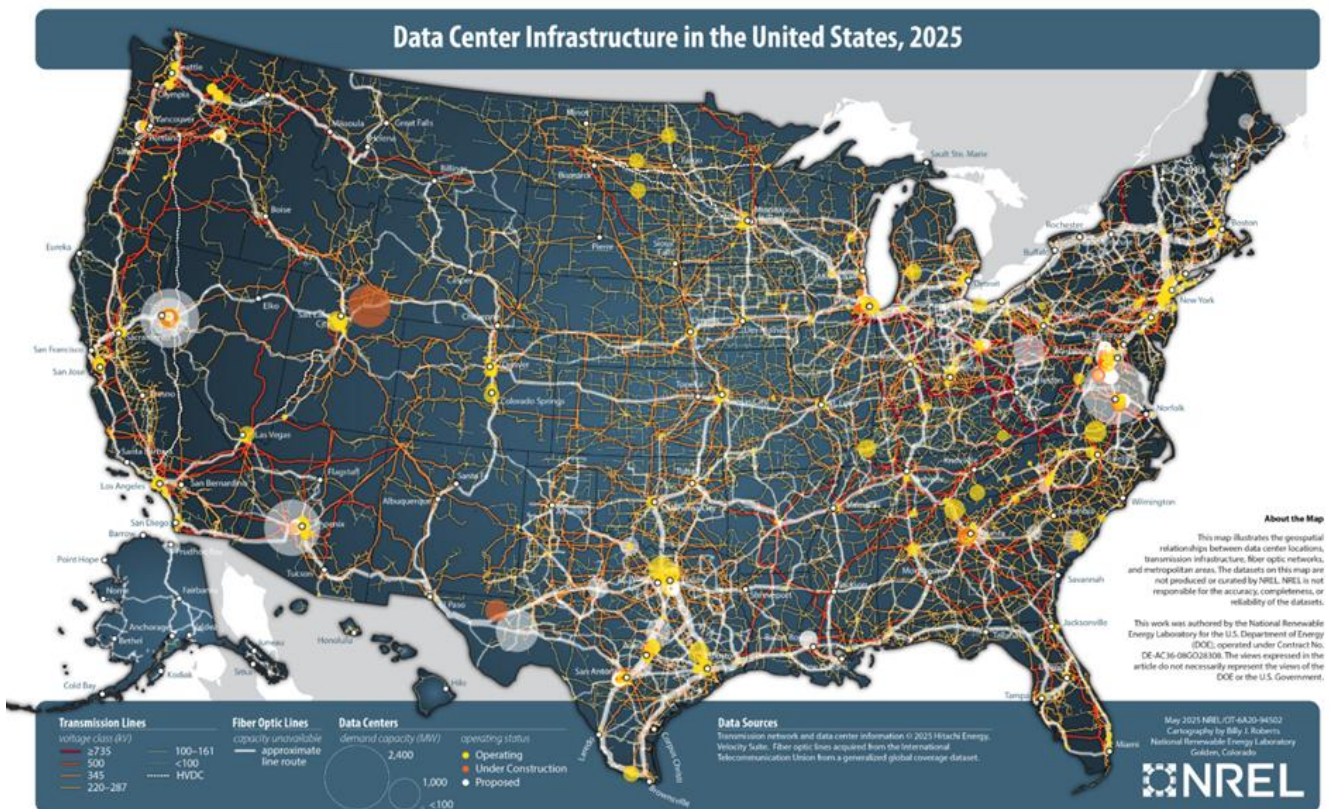


図 50 - 米国のデータセンターインフラ [125]

産業のリショアリングと半導体製造：

第二の大きな原動力は、産業回帰と新規製造投資の波であり、その多くは連邦政府の優遇措置とサプライチェーンのセキュリティ対策によって促進されている。半導体工場、バッテリー工場、クリーン・テクノロジー製造施設の増設は、従来の産業の周期的な負荷とは異なり、大規模で安定したベースロード需要を生み出している。セクター調査では、チップ、バッテリー、クリーン・エネルギー機器の3つのセクターが、今後10年間の製造業における電力需要の増加に最も大きく貢献すると特定されている。業界の動向分析によると、数十の半導体工場やギガファクトリーが建設中または計画段階にあるなど、プロジェクトがパイプラインにあることを示している。これらの施設は、単なる負荷の増加だけでなく、高品質で信頼性の高い電力を必要とし、特定の地域に集中しているため、地域の電力網への負担とインフラの迅速なアップグレードの必要性をさらに高めている [126][127]。

交通機関と建物の電化：

交通機関と建物の電化は、もう一つの長期的な成長ベクトルである。ヒートポンプの販売台数は2021年以降、毎年ガス暖房を上回っており、2023年から2024年にはその差がさらに拡大した。これは、暖房負荷が電気へと構造的に移行していることを示しているが、効率向上がこの増加を部分的に相殺している。建物の電化傾向は、EIAのAnnual Energy Outlook 2025 [124]でも強調されており、より強力な政策支援、技術コストの削減、そして消費者の普

及が織り込まれている。交通機関では、EV の着実な普及が需要に影響している。EV はガソリン消費量を削減する一方で、かなりのエネルギー消費を電力網に移行させ、住宅および商業施設の充電需要を増加させる。調査によると、ガソリン需要は鈍化しているものの、EV 普及に伴う電力負荷の増加は、特に積極的なゼロ・エミッション車規制を実施している州において、2020 年代後半に加速すると予想されている。総合的に、輸送と建物の電化は、化石燃料から送電網へエネルギー需要を再構築し、公共事業の計画と長期的な燃料ミックスの両方に影響を与えている。

気象と気候の変動

気象と気候関連の変動は、米国のエネルギー需要を左右するますます重要な要素となっている。夏の暑さは、特に長期にわたる熱波によって冷房負荷が記録的な水準に達し、地域の電力網に負担をかけ、ピーク需要を過去の水準よりも押し上げている。同様に、厳しい冬の嵐や寒波は暖房需要を増大させ、天然ガスと電力の消費量を急増させている。これらの状況は平均需要を増加させるだけでなく、ピーク負荷事象の規模と頻度を高め、システムの安定性を維持するために追加の発電・送電容量を必要としている。気温による直接的な需要に加え、ハリケーン、洪水、山火事、極渦といった深刻な事象の頻発は、家庭、企業、産業界がバックアップ発電、オンサイト蓄電、デマンドレスポンスシステムへの投資を行う中で、レジリエンスを重視したエネルギー需要を生み出している。これらのレジリエンス対策自体が、エネルギー需要全体に影響を及ぼしている。

北米電力信頼性協会（NERC）は、2024 年長期信頼性評価(LTRA)において、需要増の加速に加え、安定的な発電資源の廃止や送電制約が相まって、複数の地域において信頼性リスクを増大させていると警告した[128]。これは、データセンターの建設、電化、そして異常気象の影響が同時に重なる地域で特に深刻である。

5.3.4 長期展望（2035～2050 年）

米国では、一次エネルギー総需要は 2030 年代を通じて緩やかに減少し、2040 年代初頭まで再び増加することはないと予測されている（EIA）。一方、電力需要は、データセンター、産業の国内回帰、輸送機関および建物の電化に牽引され、着実に増加するが、成長は地域的に集中しており、時期も不透明となっている。天然ガスは短期的には電力と産業にとって依然として重要だが、再生可能エネルギーは急速に拡大しており、風力と太陽光は 2024 年に石炭を上回り、シェアを拡大し続けている。時間の経過とともに、電化によって液体燃料の需要は減少する一方で、原子力と新興技術（水素、貯蔵）は低炭素供給ミックスを強化していこう。結果として長期的な見通しでは、エネルギー消費全体は横ばいから減少するものの、電力は米国の産業の持続可能性と競争力において、引き続きますます中心的な役割を果たすことになる。以下は、米国のエネルギー需要の短期見通し（2024～2026 年）と長期見通し（2035～2050 年）を比較した表である。

短期見通し (2024–2026 年)	長期見通し (2035–2050 年)
<p>一次エネルギー：2024 年約 94 quad。生産量 (約 103quad) が消費量を上回る。米国は純輸出国のまま (EIA, 2023 年)。</p>	<p>一次エネルギー：2020 年代から 30 年代にかけて総需要が減少と予測。殆どのシナリオで 2050 年の水準は 2024 年より低い水準にとどまる (Annual Energy Outlook 2025, EIA[124])。</p>
<p>電力需要：データセンター、電化、リショアリングが牽引役で成長が再加速 (2024 年約 3%増)。2025 年 2.3%増、2026 年に 2.2%増の予測 (IEA)。</p>	<p>電力需要：データセンター、クリーン・テクノロジー製造、EV、ヒートポンプの牽引により、構造的な成長が継続。地域集中 (テキサス州、中部大西洋岸地域) により、計画上の課題が生じる。</p>
<p>天然ガス：消費量は 2025 年に過去最高 91.4bcf/d に達し、その後 2026 年に若干減少。LNG 輸出が大きな原動力 (EIA、ロイター)。</p>	<p>天然ガス：再生可能エネルギーと産業需要のバランスをとる上で依然として極めて重要だが、再生可能エネルギーと原子力の拡大に伴い相対的なシェアは低下。</p>
<p>液体燃料：効率向上と EV の普及を反映してガソリン需要は弱まる (2025 年 5 月は 2020 年以来最低の季節レベル)。(ロイター)</p>	<p>液体燃料：電動化によりガソリン需要は構造的に減少するが、石油化学製品とジェット燃料は依然として堅調。</p>
<p>再生可能エネルギーと原子力：太陽光発電容量の増加は堅調 (2024 年の新しい容量の 66%)。風力と太陽光は発電量の 17% に達し、初めて石炭を上回る (Ember、Wikipedia)。</p>	<p>再生可能エネルギーと原子力：風力・太陽光発電のシェアは着実に増加。2050 年までに原子力発電容量を 3 倍に増強 (DOE)。水素・貯蔵技術が電力システムの信頼性を強化。</p>
<p>気候と信頼性：夏の暑さと異常気象による負荷の増加、発電機の廃止、送電のボトルネックによる信頼性リスクについて警告 (2024LTRA, NERC)。</p>	<p>気候と信頼性：負荷の増加、異常気象、地政学的リスクに対処するため、送電網、送電網の柔軟性、レジリエンスへの継続的な投資が必要。</p>
<p>化石燃料：2023 年時点でも米国の一次エネルギーの約 84% を供給し、石油 (38%)、天然ガス (36%)、石炭 (約 7%) が主流を占める (EIA, 2023 年)。政権は再生可</p>	<p>化石燃料：国内シェアは徐々に減少しているものの、エネルギー安全保障と輸出力を引き続き支える (例：LNG 承認済み生産能力：最大 48bcf/d)。産業のレジリエンス維</p>

短期見通し（2024–2026年）	長期見通し（2035–2050年）
能エネルギーと並行して生産拡大を重視（エネルギーの削減ではなく、追加）。	持に戦略的に活用され、原子力と再生可能エネルギーの成長で徐々に構成が変化。

5.3.5 脱炭素化と産業持続可能性戦略

2025年以降のモデルでは、脱炭素化は、気候変動対策と産業のレジリエンスと成長を結び付ける、より広範な戦略の中に組み込まれている。現在の米国政権は、排出量削減を単独の責務として扱うのではなく、エネルギー安全保障、経済活力、そしてイノベーションの道筋という3つの相互に連動する柱の中に位置付けている。

- ・ エネルギー安全保障は、「エネルギーを減算するのではなく、足し算する」という理念に基づいて推進され、石油、ガス、原子力、地熱、再生可能エネルギーを拡大するとともに、海外の排出量の多い燃料に代わる LNG と原子力の輸出を確保する。
- ・ 経済活力は、半導体、バッテリー、クリーン・テクノロジー製造といった戦略的産業の手頃な価格、雇用創出、国内回帰を重視し、産業の力強さを確保しながら炭素漏洩を最小限に抑える。
- ・ イノベーションの道筋は、技術中立性を優先し、炭素回収、水素、SMR、地熱、AI を活用したデジタル化を支援する。これにより、市場のシグナルと民間投資が脱炭素化の次の波を牽引する。

このイノベーション重視のアプローチは、2025年以前の規制重視のモデルからの脱却を示すものである。豊富なエネルギー、競争力のある産業、そして技術中立的なイノベーションを組み合わせることで、米国の戦略は、持続可能性が今後数十年にわたって産業のリーダーシップを制限するのではなく、強化することができることを示している。

5.3.6 将来展望：2035年と2050年への道筋

現政権のアプローチが継続されれば、米国の脱炭素化は、エネルギーの豊富さ、技術革新、そして産業競争力を組み合わせた戦略を通じて推進されることになるだろう。気候変動対策目標は、単独の義務としてではなく、供給拡大、インフラの近代化、そして民間セクターにおけるクリーン技術の導入加速を目的としたシステムの成果として扱われる。

2035年までに、米国は国内システムの炭素強度を低減しつつ、世界有数のエネルギー輸出国であり続けると予想されている。天然ガスは引き続き電力と産業の安定供給に貢献するが、再生可能エネルギーの拡大と最初の SMR の稼働開始に伴い、その相対的なシェアは徐々に低下していくだろう。半導体、バッテリー、クリーン・テクノロジー製造への大規模投資は大きな負荷を増加させるが、これらの施設はますますクリーンな電力で稼働するようになる。炭素回収、水素、地熱、高度貯蔵といった新興技術は、試験段階から初期の商業展開へと移行す

ると予想されている。同時に、AI 駆動型最適化、デジタル・ツイン、スマートグリッドといったデジタルツールは、効率性の向上、無駄の削減、そして変動性再生可能エネルギーの導入拡大に必要な柔軟性をもたらす。これらの変化は相まって、電力セクターの排出量を大幅に削減すると同時に、信頼性と経済性を確保するだろう。

2050 年までに、米国の電力システムは、再生可能エネルギー、原子力、そして CO2 回収を伴う天然ガスを基盤とする、多様な低炭素電源ミックスへと進化すると予測されている。原子力発電容量は3倍に増加し、ゼロカーボン発電の信頼できる基盤となると予想されている。また、水素と CCUS は、鉄鋼、セメント、化学といった排出削減が困難な産業で広く導入されるだろう。一次エネルギー需要全体は、効率性の向上により 2024 年の水準を横ばい、またはわずかに下回ると予想されるが、輸送、建築、製造業における電化の進展に伴い、電力需要は引き続き増加する。そして、高度なデジタル化により、エネルギーシステムと産業システムが適応型で高効率なネットワークに統合され、排出原単位がさらに低下する。今世紀半ばまでに、米国は、不足や制限的な義務ではなく、イノベーション、レジリエンス、エネルギーの豊富さを活用することで、低炭素で世界的に競争力のある産業基盤を実現できることを実証するだろう。

5.3.7 脱炭素化の見通し：2025 年以前と 2025 年以降の戦略

2025 年以前：規制優先、気候変動対策義務化モデル

2025 年以前、米国の産業の持続可能性は、主にネット・ゼロ目標と炭素会計を中心に構築されていた。脱炭素化は主に以下の方法で推進された。

- 連邦または州による拘束力のある排出目標（例：クリーン・パワー・プランの枠組み、ネット・ゼロに関する大統領令）
- 化石燃料、特に石炭火力発電の廃止を義務付け、再生可能エネルギーをデフォルトの代替として優先
- 主に風力、太陽光、電気自動車、蓄電池を対象とした補助金とインセンティブ（例：IRA 2022、BIL 2021）
- コンプライアンスと規範的な技術選択を重視した規制監督

このモデルにおける脱炭素化の見通し：

- 石炭火力発電から再生可能エネルギーへの転換により、電力部門における初期段階の排出量削減が加速
- 脱炭素化において再生可能エネルギーと蓄電池への依存度が高く、天然ガス、原子力、炭素回収の役割は限定的
- 重要鉱物および太陽光発電/バッテリーの輸入に関連するサプライチェーンの脆弱性リスクの増大。
- 炭素漏出リスク：国内規制の厳格化により、エネルギー集約型産業が海外に移転し、純

利益が損なわれるリスク

- イノベーションの制約：研究開発は特定の技術に偏り、SMR、CCUS、またはハイブリッドソリューションへの投資の制限

すなわち、2025年以前のモデルはコンプライアンスに基づく迅速な炭素削減を重視していたが、その代償としてレジリエンス、供給の安定性、そしてより広範な産業競争力が犠牲になっていた。

2025年以降：豊かさ、レジリエンス、そしてイノベーションのモデル

2025年以降、米国の政策は持続可能性をより広範な枠組みへと転換し、脱炭素化はエネルギー安全保障、経済競争力、そしてイノベーションの道筋を通じて達成される。気候変動対策は依然として中心的な課題であるが、エネルギー供給の制約ではなく、拡大と多様化を通じて追求される。

2025年以降のモデルの主な特徴：

- エネルギーの削減ではなく、追加：石油、ガス、原子力、地熱、再生可能エネルギーの拡大。LNG輸出は2030年まで毎年約10%増加
- 技術中立性：CO₂回収、水素、SMR、地熱、再生可能エネルギー、デジタル化に関する研究開発と展開（特定の施策に偏ることなく）
- イノベーション主導の脱炭素化：DOE研究所の近代化、許認可制度の改革、AI/デジタル・ツインの活用でクリーン技術の商業化を加速
- 産業統合：更にクリーンで信頼性の高いエネルギーを活用し、半導体、バッテリー、クリーン・テクノロ
- 素化：LNGと原子力輸出による、海外の石炭や排出量の多い燃料を代替、間接的に世界のCO₂削減に貢献

このモデルにおける脱炭素化の見通し：

- 再生可能エネルギーと原子力発電の拡大、天然ガスとCCUS（炭素排出削減）の連携、そして水素が削減困難な産業に浸透するにつれ、長期的に着実な排出量削減が実現
- 手頃な価格と産業力を維持しながら、セクター全体で炭素強度を低減
- エネルギーミックスの多様化、輸入依存度の低減、サプライチェーンの強化により、システムのレジリエンスが向上
- イノベーションの乗数効果：デジタル化とセクター間の統合により、エネルギーの無駄が削減され、炭素排出量が最適化

5.3.8 脱炭素化 – 比較軌跡

視点	2025 年以前モデル (規制優先)	2025 年以降のモデル (豊かさとイノベーション)
アプローチ	コンプライアンス重視、炭素規制、規範的な技術選択	技術中立、イノベーション主導、エネルギーの追加と多様化
近い将来の電力部門の脱炭素化	急速な石炭火力発電の廃止：再生可能エネルギー＋貯蔵が主流	再生可能エネルギーは拡大しているが、原子力、ガス＋CCUS、水素、地熱が並行して役割を果たす
エネルギー安全保障	輸入された重要鉱物とクリーン・テクノロジーのサプライチェーンへの依存度の高まり	米国は LNG/原子力の純輸出国であり、国内エネルギー基盤は多様化
産業競争力	炭素漏出のリスク：コンプライアンスコストの上昇	手頃な価格のエネルギーの下で半導体、電池、クリーン・テクノロジー工場の国内回帰と拡大
イノベーションの方針	焦点を絞る（再生可能エネルギー、蓄電、EV）	幅広いポートフォリオ（再生可能エネルギー、SMR、CCUS、水素、デジタル化）
長期排出プロファイル	早期削減は加速するが、貯蔵/再生可能エネルギーがボトルネックになると停滞	段階的だがより弾力性のある削減。2050 年までに多様な組み合わせで炭素強度を低減
世界的な影響	国内重視、外部エネルギー市場形成における役割が弱い	LNG/原子力輸出による高炭素燃料の代替による世界的な脱炭素化

2025 年以前の「規制優先、気候義務モデル」では、米国は排出量削減をあらゆる政策設計の中心に据える。連邦規制の強化により、拘束力のある排出量上限が課され、化石燃料の廃止が加速され、再生可能エネルギーとエネルギー貯蔵への直接投資が促進される。エネルギー安全保障は再生可能エネルギーの導入と重要鉱物の輸入に大きく依存することになり、エネルギーシステムが新たな脆弱性に晒される可能性がある。規制負担が米国産業の競争力維持能力を上回れば、経済活力はより大きなリスクに直面する可能性があり、生産拠点の海外移

転に伴う炭素漏洩への懸念が高まる。イノベーションは依然として起こるものの、より限定的で規定された技術経路内で行われるため、再生可能エネルギー、電化、エネルギー貯蔵が優先され、原子力、化石燃料由来の技術と炭素回収、あるいはハイブリッドソリューションへの投資は削減される。

5.3.9 脱炭素化と循環型経済

米国の産業持続可能性へのアプローチは、エネルギー供給の拡大とインフラの近代化にとどまらない。循環型経済も包含しており、資源効率と材料回収は長期的な脱炭素化の中核を成している。この側面は、再利用、再製造、リサイクル、改修、回収を含む一連の戦略である Re-X フレームワークを通じて、ますます明確に表現されている。製品と材料の耐用年数を延ばすことで、Re-X モデルは産業生産におけるエネルギーと炭素強度を低減するとともに、設計、物流、先進製造における新たな経済機会を創出する。

循環性と脱炭素化

循環型経済は、鉄鋼、アルミニウム、プラスチック、セメントなどのエネルギー集約型セクターに関連する排出量を削減するための重要な手段である。米国の温室効果ガス排出量の約30%は産業の生産プロセスに関連しており、その大部分は原材料の採掘と加工に関連している。Re-X フレームワークを適用することで、バージン資源の需要が低下し、結果として上流における排出量とエネルギー需要の両方が削減される。例えば、自動車や航空宇宙分野における部品の再生製造では、通常、新規部品の製造に比べて80~90%のエネルギー消費量を削減できる。また、高度なリサイクル技術により、埋め立て処分されるはずだった高い価値の材料を回収することが可能となる。このように、循環型経済は、米国の持続可能性モデルの3つの柱を直接支えている。すなわち、輸入依存度を低減することでエネルギー安全保障を強化し、コスト削減と雇用創出を通じて経済活力を高め、材料回収・再利用のための新技術の育成を通じてイノベーションの道を加速させる。

REMADE 研究所の役割

米国の循環型経済の取り組みの中核を担うのは、17ある Manufacturing USA 研究所の一つである REMADE 研究所である。DOE の資金提供を受け、産業界、学界、政府のパートナーから支援を受けている REMADE は、リサイクル、再生製造、材料効率化のためのスケーラブルなソリューションを開発することで、製造におけるエネルギーと排出量を削減する技術に焦点を当てている。研究分野には以下が含まれている。

- 再利用と再生製造のための設計：製品を廃棄するのではなく、分解してアップグレードすることを可能にする
- ポリマー、金属、繊維をリサイクルするシステム、閉ループ型サプライチェーンの推進
- 廃棄物の削減、重要材料の回収、材料生産におけるエネルギー利用の最適化を実現するプロセスイノベーション

REMADE は人材育成にも力を入れており、米国産業界全体に Re-X 実践を導入するために

必要なスキルを持つエンジニアや技術者を育成している。応用研究開発と研修、そして商業化を連携させることで、REMADE は米国産業持続可能性戦略の基盤となる官民協働型パートナーシップモデルの好例となっている。

長期的な脱炭素化目標を達成するには、Re-X フレームワークを主な産業界に適用することが不可欠である。新たなデータセンター、EV、そしてクリーン・テクノロジーを活用した製造業の発展により電力需要が増加する中、材料に含まれるエネルギーを削減することは、持続可能性への道筋と並行して存在する。許認可制度の改革、投資インセンティブ、そして Manufacturing USA と MEP ネットワークを通じた連携の拡大によって支えられれば、Re-X フレームワークは産業部門の排出量を大幅に削減すると同時にサプライチェーンのショックに対するレジリエンスを高めることができる。このビジョンにおいて、循環性は持続可能性の補助的な要素ではなく、低炭素で資源効率が高く、世界的に競争力のある産業システムを構築するための中核戦略となる。

循環性とマイクロプラスチック問題への取り組み

再利用、再製造、リサイクルといった循環型経済の戦略は、産業からの排出物や廃棄物を削減できるだけでなく、米国で最も差し迫った環境問題の一つであるマイクロプラスチック汚染への取り組みにおいても極めて重要な役割を果たす。マイクロプラスチックは、劣化した消費財、合成繊維、タイヤの摩耗、そして不適切な廃棄物処理に由来する。米国では EPA が 2018 年に 3,570 万トンのプラスチック廃棄物が発生したと報告した。一方、NREL の最近の研究では、年間 4,400 万トン近くに達すると推定されており、その多くはリサイクル・インフラの不足により埋め立て、焼却、あるいは自然生態系への流出に至っている[129]。

マイクロプラスチックは現在、米国の水路、農業用土壌、さらには人間の血流中にも存在し、長期的な生態系および健康への影響が懸念されている。マイクロプラスチックの残留は生態系のレジリエンスを損ない、漁業、農業、公衆衛生に隠れたコストを課している。さらに、バージンプラスチックの生産はエネルギー集約型であり、多くの場合、GHG 排出を増加させる石油化学原料に依存している。したがって、プラスチック廃棄物への取り組みは、環境上の責務であるだけでなく、産業上の責務でもある。

マイクロプラスチックの蔓延は、プラスチック材料の大量生産と廃棄と密接に関連している。2018 年、米国は約 3,570 万トンのプラスチック廃棄物を排出し、これは全都市固形廃棄物の 12.2% を占めた。注目すべきは、プラスチックのリサイクル率が依然として低く、わずか 8.7% (約 300 万トン) しかリサイクルされていないことである。これらのプラスチック廃棄物の多くは埋め立てまたは焼却され、環境汚染やプラスチックのマイクロプラスチックへの破砕につながっている[130]。

米国におけるマイクロプラスチック問題は、プラスチックの大量生産と不適切な廃棄物管理に起因する多面的な問題である。環境中に広く存在するマイクロプラスチックとそれが人体への潜在的な健康影響は、この高まる懸念に対処するための効果的な介入の緊急性を浮き彫りにしている[131]。マイクロプラスチックの環境への影響は甚大であり、これらの粒子は、淡水域や海洋環境を含む様々な生態系で検出されている。研究では、湖、河川、水生生物にマイクロプラスチックが存在することが確認されており、野生生物の健康や食物連鎖における

生体蓄積の可能性に対する懸念が高まっている[132]。マイクロプラスチック問題に対処するには、リサイクル率の向上、プラスチック生産の削減、使い捨てプラスチックの使用を制限する政策の実施など、包括的な廃棄物管理戦略が必要であり、これらは重要なステップである。



図 51 - 循環型経済を構築するための米国の活動[133]

マイクロプラスチック危機への対応には、政策立案者、産業界、研究者、そして消費者の協力的な行動が不可欠である。プラスチック汚染による長期的な環境と健康への影響を軽減し、より持続可能でプラスチックに配慮した未来へと移行していくためには、イノベーション、規制、そして行動変容を優先する多面的なアプローチが不可欠である。

この問題に対処するため、米国は、循環型経済モデルや強化された材料リサイクルなど、プラスチック廃棄物の削減とマイクロプラスチックの拡散抑制を目的とした様々な持続可能性イニシアチブを実施している。

EPA の取り組み

EPA は、プラスチック汚染問題への対応として、循環型経済の推進を積極的に進めている。2024 年 11 月、EPA は「プラスチック汚染防止のための国家戦略」を発表し、プラスチック生産による汚染の削減、材料・製品設計の革新、廃棄物管理慣行の改善といった目標を概説し

た[134]。この戦略は、プラスチック製品のライフサイクル全体にわたるプラスチック汚染に対処するための包括的な計画を概説しており、2040年までにプラスチック廃棄物の環境への排出をゼロにすることを目指し、以下の6つの主要目標に焦点を当てている。

1. プラスチック生産による汚染の削減

- 規制措置の強化：化石燃料採掘、石油化学、プラスチック生産施設に関する規制を見直し、更新し、環境と健康への影響を最小限に抑える
- 環境基準の推進：厳格な環境基準に基づいて製造されたプラスチック製品を認定するための自主認証制度の創設を検討する
- 環境不正への取り組み：プラスチック生産施設に関連する環境不正と公衆衛生への影響を特定し、軽減する。

2. 素材と製品設計の革新

- 循環型設計：再利用可能、リサイクル可能、または堆肥化可能な製品の開発を促進し、製品のライフサイクルを延長し、廃棄物を削減する。
- 持続可能な素材の支援：従来のプラスチックに比べ環境負荷の少ない代替素材の研究開発に投資する。

3. 廃棄物発生量の削減

- 再利用と削減の促進：使い捨てプラスチックの削減と再利用可能な製品の導入を優先する消費者行動とビジネス慣行を奨励する。
- 拡大生産者責任の実施：生産者に製品のライフサイクル全体に対する責任を負わせる政策を策定し、廃棄物の削減と製品設計の改善を奨励する。

4. 廃棄物管理の改善

- リサイクル・インフラの強化：より幅広いプラスチック素材を効率的に処理できるよう、リサイクル施設の近代化に投資する。
- リサイクル慣行の標準化：リサイクルにおける汚染の低減とリサイクル素材の品質向上のため、統一ガイドラインを策定する。

5. プラスチック汚染の回収と除去の改善

- 浄化技術の開発：陸上および水域環境からプラスチック廃棄物を効果的に除去するための革新的な技術と手法に投資する。
- 地域社会の浄化活動の支援：地域社会や自然生息地からプラスチック汚染を除去することを目的とした地域活動に、資源と支援を提供する。

6. 水路と海洋への負荷と影響の最小化

- 発生源削減戦略の実施：雨水管理や廃水処理の強化など、水路に流入するプラスチック汚染の発生源を特定し、管理する。
- 海洋生態系の保護：プラスチック廃棄物の海洋環境への流入を防ぎ、水生生物と生息地を保護するための規制を策定・施行する。

この戦略は、米国を循環型経済へと移行させる上で、企業、政府、非政府組織、学界、そして消費者が協力するアプローチを重視している。このアプローチは、廃棄物と汚染の排除、製品と材料の有効利用、そして自然システムの再生に重点を置いている。

NIST の取り組み

2024 年 3 月、NIST は 6 つの大学に約 300 万ドルを助成し、プラスチックの循環型経済を促進する教育プログラムを開発した。この取り組みは、NIST のプラスチック循環性向上のためのトレーニング (TIPC) 助成金プログラムの一環であり、プラスチックの生産、消費、廃棄物管理に関連する課題に取り組むために必要なスキルを学生に身につけさせることを目的としている[135]。

助成プログラムは、材料科学、経済学、ビジネス、工学など、さまざまな分野を統合し、プラスチックの循環性への包括的なアプローチを提供することを目的としている。これらの学際的な視点を取り入れることで、学生はプラスチック廃棄物の管理とリサイクルに影響を与える経済、技術、環境要因への理解を深めることができる。この取り組みの主な焦点は、プラスチックが生産、使用、廃棄される直線型経済から、再利用、修理、リサイクルを重視する循環型経済への移行である。この移行は、プラスチック材料のライフサイクルを延長し、環境汚染を削減し、より持続可能な製造方法の開発を促進することを目的としている。参加大学はそれぞれ、プラスチック循環の様々な側面に対応するためにプログラムをカスタマイズする。新しいリサイクル技術の開発に重点を置く大学もあれば、持続可能な材料の設計や循環型社会の実践を支援するビジネスモデルの構築に取り組む大学もある。産業界のリーダー、研究者、学生間の連携を促進することで、NIST のイニシアチブはイノベーションを推進し、廃棄物の削減と環境責任の強化につながる持続可能なプラスチック管理戦略の実施において、米国産業界を支援することが期待されている。

DOE の取り組み

2025 年までに、DOE は、プラスチックリサイクル技術の向上、プラスチック廃棄物の削減、プラスチック生産におけるカーボンフットプリントの削減を目的とした 7 つのプロジェクトに 1,340 万ドルを割り当てた。この投資は、バイデン政権によるクリーン・エネルギー経済の構築と 2050 年までの実質ゼロ炭素排出の達成に向けた取り組みを支援するものだった。産業界と大学が主導する選定されたプロジェクトは、プラスチックフィルムをより価値の高い材料に変換すること、そしてよりリサイクル性と生分解性に優れた新しいプラスチックを設計することに重点を置いている。ビニール袋、ラップ、フィルムなどの使い捨てプラスチックは、製造に多くのエネルギーを消費し、米国の総エネルギー消費量の 3%以上を占めており、その高いエネルギー消費量にもかかわらず、最終的に埋め立て地や環境に廃棄され、現在リサイクルされているのは 10%未満となっている[136]。

資金提供を受けたプロジェクトは、プラスチックフィルムをより価値の高い材料にアップサイクルするための手頃なソリューションの開発、およびよりリサイクル可能で生分解性の高い新しいプラスチックの設計を目指しており、使い捨てプラスチックのリサイクルプロセスとプラスチック自体の両方に革新をもたらす。この資金提供の機会には、BOTTLE (Bio-

Optimized Technologies to keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment) コンソーシアムや REMADE 研究所など DOE の投資を基盤としている[137]。DOE のエネルギー効率および再生可能エネルギー局の先進製造局とバイオエネルギー技術局がこれらの投資を監督しており、DOE の科学局、化石エネルギーおよび炭素管理局、および ARPA-E もプラスチックの研究開発活動の支援において重要な役割を果たしている。

5.4 欧州の活動

5.4.1 欧州グリーン・ディール

欧州グリーン・ディールは、気候変動と闘い、より持続可能な経済を促進するための包括的な欧州戦略である[139]。グリーン・ディールには、CO2 排出量の削減から、再生可能エネルギーや環境に優しい技術への投資まで、数多くの取り組みが含まれており、COVID-19 パンデミックから脱出するための生命線でもある。NextGenerationEU Recovery Plan からの 1 兆 8,000 億ユーロの投資と、欧州の 7 カ年予算の 3 分の 1 が、欧州グリーン・ディールに充てられている。

欧州グリーン・ディールの目的は、2050 年までに欧州を気候ニュートラルにすること、すなわち、温室効果ガスを正味で排出しないようにすることである。これは、エネルギー生産、産業、輸送、農業、生物多様性の保護に至るまで、経済と社会のあらゆる分野に影響を及ぼす包括的な戦略である。グリーン・ディールは、欧州をより環境にやさしく持続可能な経済圏に変えるという長期的目標を追求している。

The first climate-neutral continent
by 2050

At least 55% less
net greenhouse gas
emissions by 2030,
compared to 1990 levels

3 billion
additional trees to be
planted in the EU by 2030

図 52 - 欧州グリーン・ディールの主な指標[139]

図 52 に示すように、欧州グリーン・ディールの主な目的は以下の通りである：

1. 2050年までの気候中立性

欧州は、2050年までに温室効果ガス（温室効果ガス）排出量を正味ゼロにすることを目指しており、これは、すべての排出量を森林再生、炭素回収、その他の技術などの対策によって相殺しなければならないことを意味する。これはグリーン・ディールの中核的な目標であり、広範囲にわたる政策、投資、技術革新によって達成される。

2. 温室効果ガス排出量の削減

2030年までに、欧州の温室効果ガス排出量を1990年比で少なくとも55%削減する。これは、排出規制の強化、再生可能エネルギーの拡大、よりクリーンな輸送技術への移行、エネルギー効率の促進によって達成される。

3. 再生可能エネルギーの促進

グリーン・ディールの重要な部分は、化石燃料への依存を減らし、エネルギー分野の脱炭素化を図るため、太陽エネルギー、風力エネルギー、水エネルギーなどの再生可能エネルギーを促進する。

4. 生物多様性の保護

グリーン・ディールは、生物多様性を保護し、欧州の天然資源を保全することも目的としている。これには、汚染対策、生態系の回復、生息地などの生物多様性の保護が含まれる。

5. 循環型経済

もうひとつの目標は、資源をより効率的に使用し、廃棄物を削減する循環型経済を促進することである。製品はより長く使用され、リサイクルや再利用が容易でなければならない。

6. 持続可能なモビリティ

欧州は、輸送部門をより気候変動に優しいものにするため、包括的な転換を計画している。これには、電気自動車の普及促進、公共交通機関の拡充、航空・船舶におけるCO2排出量の削減などの対策が含まれる。

7. 公正な経済変革

欧州グリーン・ディールは、経済の変革が社会的に公正なものであることを保証する。例えば「公正な変革基金（Just Transition Fund）」を通じて、変革によって特に影響を受ける地域や分野に対する支援も含まれ、雇用を創出し、経済の不均衡を防ぐ。

8. グリーン投資とイノベーション

グリーン・ディールを支援するためには、グリーン技術およびイノベーションへの大規模な投資が必要である。例えば、環境問題解決を目的とした事業に資金を調達する債券であるグリーンボンドや、各種の支援プログラムを通じて、企業や投資家が持続可能なプロジェクトに投資するインセンティブを創出する。これには、例として以下のような活動がある[139]。

- REPowerEU
- グリーン・ディール産業計画
- エネルギー危機に対処するための欧州の行動

5.4.2 REPowerEU

ロシアのウクライナ侵攻による苦難と世界的なエネルギー市場の混乱を受け、欧州委員会は、ロシアの化石燃料輸入を段階的に廃止する REPowerEU を進めている[140]。2022 年 5 月に開始された REPowerEU は、欧州の省エネルギー、エネルギー供給の多様化、クリーン・エネルギーの生産を支援することで、欧州委員会は欧州市民と企業をエネルギー不足から守り、ロシアの戦力を弱めることでウクライナを支援し、クリーン・エネルギーへの移行を加速させ、価格を安定させた。2025 年末までに欧州諸国はロシアのガス、原子力エネルギー、石油の輸入を段階的に廃止するために、どのように貢献するかを定めた国家計画を作成する。同時に、欧州のエネルギー転換を加速させ、エネルギー供給を多様化させ、供給の安定と市場の安定に対するリスクを排除するための努力も継続する。

安価なエネルギーの確保

欧州のエネルギー価格は、欧州の協調的な対応と REPowerEU によって 2022 年のピーク時に比べて大幅に低下した。欧州はクリーンで手ごろな価格のエネルギーを生産し、エネルギー自給を確保するために投資を行っている。ロシアによるウクライナへの全面侵攻を受けて、欧州は人々が手頃な価格のエネルギーを利用できるようにし、エネルギー供給の途絶を回避するために、共同ガス調達を提案した。これにより、欧州として共同でガス需要の一部を調達できるようになり、希少な供給をめぐって競争する必要がなくなった。2022 年 4 月に発足した欧州エネルギー・プラットフォームは、エネルギー供給の多様化において重要な役割を果たしている。このプラットフォームは、インフラ投資や外部のガス供給業者との交渉を調整し、EU 諸国が互いに価格競争を繰り広げるのを防ぐ。また、欧州単一市場の力を活用し、すべての消費者にとってより良い条件を実現する。

クリーン・エネルギーへの移行の加速

REPowerEU は、グリーンへの移行を加速し、再生可能エネルギーへの大規模な投資を促進する。これに関して、2023 年 11 月に改正再生可能エネルギー指令が発効され、欧州全体のエネルギー消費に占める自然エネルギーの割合を高めることを目指しており、2030 年までの

目標を 42.5%に引き上げ、最終的には 45%まで到達することを目指している。これは、欧州における再生可能エネルギーの割合をほぼ倍増させることになる。

クリーンな移行を支援するためには、欧州は自国の産業育成に力を入れなければならない。これを達成するため、2023 年 2 月に欧州グリーン・ディール産業計画が策定された。この計画は、欧州の製造業界が、欧州の野心的な気候変動目標を達成するために必要なネット・ゼロ技術と製品の生産を拡大できるようにするものである。

2023 年末、欧州委員会は電力網の拡大を加速させるための行動計画を発表した。欧州市場が完全に統合され、インフラ網が近代化されれば、市民と企業はより安価でクリーンなエネルギーの恩恵を確実に受けることができる。同年、欧州委員会は、他のエネルギーおよび気候に関する規則とともに、エネルギー効率指令も改正した。この新しい規則は、「エネルギー効率優先」の原則を定めたもので、実際には、エネルギーおよび非エネルギー分野におけるすべての関連政策および主要投資の決定において、欧州諸国はエネルギー効率を考慮しなければならない。この規則はまた、2030 年までに温室効果ガス排出量を 1990 年比で少なくとも 55%削減するという気候変動に関する野心的な目標を確実に達成するためのものでもある。

2024 年 7 月、欧州の電力市場設計改革が発効した。これは、欧州のエネルギー市場をより弾力的なものにし、エネルギー料金を短期的な電力市場価格から独立させることによって、市民や企業に利益をもたらすものである。この改革はまた、エネルギーシステムにおけるより多くの再生可能エネルギー源の統合を加速し、市場操作に対する保護を強化するのに役立つ。

そして、欧州の産業の競争力とレジリエンスをさらに強化するための大規模な事業計画であるクリーン・インダストリアル・ディールが、2025 年初頭に提案された。このディールは、エネルギー価格の引き下げ、質の高い雇用の創出、そして企業が繁栄するための適切な条件の整備によって、脱炭素化を加速させると同時に欧州の製造業を活性化させるものである。

5.4.3 グリーン・ディール産業計画

グリーン・ディール産業計画は、欧州のネット・ゼロ産業の競争力を強化し、気候中立性への移行を加速するものである[141]。これは、欧州の野心的な気候変動の目標を達成するために必要なネット・ゼロ技術と製品に関する製造能力を欧州内で拡大するための、より支援的な環境を整備することで実現する。

ネット・ゼロへの道筋について、欧州委員会は図 53 に示す主要指標を挙げている。

Over €100 billion is the value of EU's net-zero start-ups ecosystem in 2021, doubling since 2020	More than 400 GW of wind and solar renewable energy production capacity in the EU in 2022, an increase of over 25% compared to 2020	4.5 million green jobs in the European economy in 2019 up from 3.2 million in 2000
--	---	--

図 53 - グリーン・ディール産業計画の主要指標[141]

グリーン・ディール産業計画は、産業革新とクリーン技術の本拠地としての欧州の地位を確立するため、以下の4つの重要な項目をカバーする。

1. 予測可能で簡素化された規制環境

よりシンプルで迅速、かつ予測可能な枠組みを構築し、原材料に必要な量を確保し、利用者が自然エネルギーの低コストの恩恵を受けられるようにする。この推進を支援するために、以下の3つの活動がある。

- 洋上風力発電ネット・ゼロ産業法
ネット・ゼロ産業能力の目標を特定し、その迅速な展開に適した規制の枠組みを提供する。
- 重要原材料法
主要技術の製造に不可欠なレアアースなどの原材料への十分なアクセスを確保する。
- 電力市場設計の改革
消費者が自然エネルギーのコスト削減の恩恵を受けられるようにする。

2. 資金調達の迅速化

欧州におけるクリーンテック生産への投資と資金調達を加速させる。

競争政策の下で、欧州委員会は、単一市場内で公平な競争条件を保証する一方、加盟国がグリーン転換を加速させるために必要な援助を与えやすくすることを目指す。そのための援助の迅速化と簡素化を図るために、欧州委員会は加盟国と協議し、一時的な国家援助の危機と移行枠組みを改正し、グリーン・ディールに照らして一般的なブロック免除規則を改正した。

また、欧州委員会は、REPowerEU、InvestEU、Innovation Fundを中心に、クリーン技術のイノベーション、製造、普及に資金を提供するための既存の欧州資金の利用を促進する。欧州委員会は、投資ニーズに対する中期的な構造的回答として、欧州主権基金の設立も検討している。

3. スキルの向上

新技術の大幅な成長に伴い、この分野のスキルおよび熟練労働者の大幅な増加が必要となる。欧州委員会は、グリーンな移行を実現するために必要なスキルを開発するために、戦略的産業におけるスキルの向上と再教育プログラムの展開を支援するネット・ゼロ産業アカデミーの設立を提案した。そして、資格に基づく既存のアプローチに、実際のスキルを認識する「スキル第一」のアプローチを組み合わせる方法を検討し、優先分野での欧州労働市場への第三国の人へのアクセスを促進する方法を検討し、スキル開発のための公的資金と民間資金を育成・調整する措置を検討している。

4. 強靱なサプライチェーンのための開かれた貿易

公正な競争と開かれた貿易の原則の下、欧州のパートナーとの関係と世界貿易機関(WTO)の活動を基礎として世界的な協力を行い、貿易をグリーンな移行のために機能させる。そのために、欧州委員会は、欧州の自由貿易協定(FTA)のネットワークや、グリーンな移行を支援するためのパートナーとの協業を引き続き発展させていく。また不公正な貿易慣行から単一市場を守り続ける。

5.4.4 エネルギー危機に対処するための欧州の行動

ロシアによるウクライナへの軍事侵攻とガス供給の武器化は、欧州に前例のないエネルギー危機を引き起こした。これはエネルギー価格の高騰を招き、欧州の人々に苦難をもたらした[142]。

これを受けて、欧州は2022年に緊急対策を実施し、エネルギー価格を安定させ、冬季のガス供給へのアクセスを確保した。欧州委員会は、市民や企業に影響を与える高止まりするエネルギーコストへの対応に現在注力している。このため、2025年2月、エネルギーコストの削減、エネルギー同盟の完成、投資の誘致、潜在的なエネルギー危機への備えの強化を目的とした新たな行動計画を発表した。

2022年6月と7月には、欧州委員会は、冬季におけるロシアからの突然の供給停止にも耐えられるよう、欧州に十分なガス供給量を確保するための新たな規則を提案した。新しいガス貯蔵規則では、欧州諸国は毎年11月1日までに貯蔵施設を90%まで満杯にしなければならない。2024-2025年の冬季シーズン開始時点で、ガス貯蔵施設は95%満杯であり、2024年8月にはすでに90%の基準値に達していた。さらに2022年8月、欧州諸国は2022/2023年冬季の天然ガス需要を15%自主的に削減する規制に合意し、その後、2023/2024年冬季にも拡大した。2024年3月、欧州理事会は、2017年4月から2022年3月までの平均需要に比べ、全体で15%のガス需要削減を維持するための自主的措置を2025年3月まで継続するよう求める勧告を採択した。

また、2022年4月、欧州委員会は欧州諸国が世界市場で協力するための「欧州エネルギー・プラットフォーム」を立ち上げた。その目的は、欧州諸国間の競争を回避し、欧州の影響力を利用して多様なエネルギー源を確保し、主要供給者間の競争を促し、消費者にとってより良い条件を実現することである。

安全で安価なエネルギー供給を確保するために重要なのは、供給ルートの多様化である。過去数年間、欧州は国際的なパートナーと協力し、供給の多様化を図ってきた。2022年以降、欧州委員会はエジプト、イスラエル、アゼルバイジャンとの間で、天然ガスを欧州に輸出するための協定を結んでいる。欧州はまた、北米、オーストラリア、カタール、東アフリカからの液化天然ガス(LNG)の輸入を増やし、ノルウェー、英国、アゼルバイジャン、北アフリカからのパイプラインを通じて輸入している。LNG基地とガス・インターコネクトへの投資により、欧州のすべての国が少なくとも2つの供給源からガスを受け取れるようになり、隣国同士でのガスの相互補充も可能になった。例えば、2022年5月にはポーランドとリトアニアのガスインターコネクターが稼働を開始し、バルト海ガス市場のオプション性と弾力性が強化

された。2022年10月にはギリシャ-ブルガリア間のガス・インターコネクトが開始され、南東欧州のガス供給を多様化する上で重要な役割を果たしている。

海外に供給源を確保するだけでなく、可能な限り自国のエネルギーを利用しなければならない。欧州はすでに、再生可能エネルギーの技術開発において世界をリードしている。2023年には、欧州のエネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合は24.5%となる。図54に示す2023年11月に改正された再生可能エネルギー指令により、欧州諸国は、2030年までに欧州レベルで少なくとも42.5%の再生可能エネルギーを導入し、少なくとも45%を目指す目標に合意した。2022年12月、再生可能エネルギーの導入を加速するため、欧州諸国は許可交付プロセスの合理化を可能にする暫定規則についても合意した。

Renewable energy in the EU	24.5% share of renewables in EU's energy consumption in 2023	42.5% overall renewable energy target at EU level by 2030 (with the aim to reach at least 45%)
--------------------------------------	---	--

図 54 - 再生可能エネルギー開発の主要指標[142]

ロシアがエネルギーを武器として利用する動きへの対応として、欧州諸国は2022年10月、欧州の家庭や企業のエネルギー料金を削減するための緊急介入措置に合意した。これには以下の例外的な措置が含まれていた。

- 電力需要を削減する（全体で10%、ピーク時には5%の削減を義務付ける）。
- 原子力、褐炭、再生可能エネルギーなどの低コストのエネルギー生産者からの収入に上限を設け（1MWhあたり180ユーロ）、余剰分を消費者に再分配する。
- 石油、ガス、石炭、製油セクターの超過利益に対する一時的な連帯拠出金を導入し、エネルギー消費者に資金を振り向ける。

この緊急措置は2023年に失効した。

また、2023年2月、欧州諸国はエネルギー市場と金融市場の混乱を回避するための市場調整メカニズムについても合意した。このメカニズムは、必要に応じて自動的に発動されることになっていた。

- 1ヶ月先の権益移転制度（TTF）価格が3営業日にわたって180ユーロ/MWhを超えた場合、および、
- TTF価格が、同じ3営業日にわたって国際市場における液化天然ガス（LNG）の基準価格より35ユーロ高かった場合。

このメカニズムは2025年1月まで有効だったが、構造的な需要の減少、信頼できるパートナーからの信頼できるLNGとパイプラインの輸入、輸入インフラの強化といった要因により、

発動する必要はなかった。

しかしながら、欧州の EU におけるエネルギー価格は構造的に依然として高止まりしており、市民と産業の競争力に打撃を与えている。そのため、欧州委員会は 2025 年 2 月に「手頃な価格のエネルギー行動計画」を提案した。この計画は、欧州全体の市民、企業、産業界、地域社会のエネルギーコストを削減し、エネルギー同盟を完成させ、投資を誘致し、潜在的なエネルギー危機への備えを強化するための具体的な短期的措置を定めている。これにより、2025 年には総額 450 億ユーロの節約が可能になると推定され、2030 年までに年間最大 1,300 億ユーロ、2040 年までに年間 2,600 億ユーロの節約を見込んでいる。

5.4.5 マイクロプラスチック問題

マイクロプラスチックは、様々な形状のプラスチック粒子であり、空気中、土壌中、淡水中、海洋中、生物相中、そして私たちの食生活に存在している。より大きなプラスチックやマイクロプラスチックの断片化や劣化により、ナノプラスチックが形成される可能性は十分にある。科学者、政策立案者、そして一般市民は、ナノプラスチックやマイクロプラスチック（これらを総称して「NMPs」と呼ぶ）の偏在性と、それらが私たちの環境や人体に及ぼす影響、危険性、リスクをめぐる不確実性の両方について、ますます懸念を深めている。

NMPs は 5mm 以下の大きさで、漁業、製品、繊維製品、農業、工業、廃棄物、ごみなど、様々な発生源からもたらされる (Arthur, 2009; Thompson et al., 2004)。科学的根拠と政策的背景は、欧州委員会の科学的助言メカニズムによって検討され、2019 年 1 月に報告書が発表された[143]。報告書の時点では、マイクロプラスチックのリスクに関する具体的な証拠がなかったため、リスクが存在するとも、もともと存在しないとも、十分な確証をもって結論づけることはできなかった。一方、欧州委員会の科学的助言メカニズムの作業部会は、環境的なシナリオだけでなく、こうした将来の社会経済的なシナリオについてもさらに調査する必要があるとした。

作業部会の主な結論は以下となっている[144]。

- 5mm 以下の微小粒子であるマイクロプラスチックは、大気、土壌、堆積物、淡水、海、植物、動物、そして人の食生活のいくつかの構成要素にすでに存在している。
- これらの粒子は、プラスチック製品、繊維製品、漁業、農業、工業、一般廃棄物など、さまざまな原因から発生している。
- 管理された実験では、高濃度のこれらの粒子は、炎症やストレスを誘発するなど、環境や生物に物理的な害を与えることが示されている。
- しかし、現実世界の多くの場所で測定された濃度レベルは、この閾値をはるかに下回っている（現在利用可能な測定方法には限界もある）。
- 一方、環境の他の部分では、これらの粒子のレベルや影響について信頼できる証拠はない。これは特にナノプラスチックに言えることで測定や評価が非常に難しい。

その後、2023 年 10 月 17 日に、合成ポリマーの微粒子について、単独あるいは意図的に混

合物に添加することを制限する委員会規則 (EU2023/2055)がマイクロプラスチック規制として認知されるようになった[145]。2025年4月8日、欧州理事会と欧州議会は、プラスチック製品の製造に使用される工業原料であるプラスチックペレットの環境中への流出防止に関する規制についても暫定合意した[146]。

5.5 地域間の類似点と相違点

本章では、日本、米国、欧州のエネルギー、脱炭素、環境問題への取り組みを見てきた。

3地域とも、温室効果ガスの排出削減や再生可能エネルギーの推進を含む戦略に基づき、今世紀半ばまでにカーボン・ニュートラルの達成を目指している。経済成長と環境負荷低減を両立させるため、どの地域も再生可能エネルギー拡大のための技術開発や税制優遇措置などの施策を推進している。さらに、すべての地域が循環型経済への移行を目指し、資源効率の向上と廃棄物の削減に取り組んでいる。

3地域の課題認識は概ね同一であるものの、具体的な施策については経済的・文化的背景を反映して若干の違いが見られた。

例えば、マイクロプラスチック問題への対策は地域によって異なり、重視する度合いや規制のレベルも異なる。日本では、自主的な削減努力とリサイクル法に重点が置かれており、マイクロプラスチック問題に対する取り組みは最近始まったばかりである。米国の戦略は、米国環境保護庁が主導する科学的根拠に基づくライフサイクル・アプローチを重視しており、州レベルの取り組み、業界の自主的な行動、リサイクルと持続可能な素材への投資によって支えられている。この分散型のイノベーション主導モデルは、利害関係者の協業を統合し、より広範なサーキュラーエコノミーと環境目標の達成をめざしたものである。欧州では、科学的分析と勧告に基づき、マイクロプラスチック規制やプラスチックペレットの紛失防止対策など、マイクロプラスチックに関する厳しい規制が普及しつつある。

また、エネルギー戦略や地域活性化の観点でも具体的な施策が異なっている。日本では、地域エネルギーミックス戦略に基づいて、半導体製造やデータセンター建設などで分散化が進められている。米国はレジリエンス、豊かさ、そしてイノベーションを中心とした実際的なモデルを通じて、産業の持続可能性を2025年に再定義した。このモデルにおいて、米国は「エネルギーの削減ではなく、追加」を重視し、長期的には脱炭素化を実現するエネルギーミックスに変えていくことで、産業の持続可能性と脱炭素の両立、同時にエネルギーの輸出によるリーダーシップを強化しようとしている。エネルギーコストの上昇と地政学的リスクに直面している欧州は、REPowerEU計画を通じてロシアの化石燃料への依存を減らし、再生可能エネルギーを統合し、加盟国間のインフラ整備を調和させることに注力している。

以上のように施策の違いはあるものの、今回の議論を通じて、エネルギー、脱炭素化、環境問題に対する共通の課題と解決策が明らかになり、国際協力の重要性を再確認した。

【コラム】 エネルギー安全保障と産業振興の両立

エネルギー安全保障と産業振興は密接な関係にあり、両分野で大きな課題が生じている。エネルギー取引価格の変動が問題視され、安定化のためのデジタル・ソリューションが議論されている。特に鉄鋼や化学などエネルギーの安定供給に大きく依存する産業は、大きな課題に直面している。また、FA（ファクトリーオートメーション）分野の中でも工作機械のような自動化機器を使用する中小企業は、エネルギー問題に非常に敏感である。本コラムでは、エネルギー安全保障と産業振興の両立に向けた日本、欧州、米国それぞれの取り組みを紹介する。

日本の取り組み

日本では、東日本大震災における福島事故を受けて、エネルギー政策の一環として原子力を見直す動きがある。自然エネルギーが地理的制約に直面して未だ十分に稼働していない一方で、原子力はベースロードとして見直されている。東日本大震災や COVID-19 パンデミックのような災害に対し、政府はエネルギー視点で中小企業にセーフティネットを提供してきた。しかし、これは短期的な対策である。長期的には、光ファイバーをはじめとする豊富な通信網、半導体などの産業復興、データセンターの立地など、自然エネルギーが比較的安定し、大学などの技術基盤がしっかりしている北九州地域や北海道地域でエコシステムを形成する計画である。これは、長期的な産業振興戦略にエネルギーへの配慮が含まれ始めていることを示している。

欧州の取り組み

EuroHPC イニシアチブは、世界最高水準のスーパーコンピューティング能力を開発するための欧州の野心的な推進策であり、AI 開発に不可欠なハイパフォーマンス・コンピューティング（HPC）基盤のネットワークを確立するものである。このイニシアチブは、高度な AI 研究とアプリケーションに必要な計算能力を提供することで、「AI 大陸」になるという欧州のビジョンを直接支援する。

同イニシアチブは、クラウド基盤とサービスに関する欧州共通の重要プロジェクトや、主権クラウドとデータ基盤の開発を目指す O-CEI(Open Cloud Edge IoT)などのホライゾン・ヨーロッパ CEI(Cloud Edge IoT)パイロット・プロジェクトと相乗効果を発揮する。これらのプログラムを組み合わせることで、欧州の枠組みの中で AI アプリケーションを安全に開発、テスト、展開できる強固なエコシステムを構築する。

グリーン・ディール構想で議論している環境の持続可能性は、両プログラムに基本的に統合されている。EuroHPC のスーパーコンピューティングセンターは、エネルギー効率を念頭に設計されており、多くの場合、再生可能エネルギー源と革新的な冷却ソリューションを使用している。例えば、フィンランドの LUMI スーパーコンピュータは 100%水力発電を利用しており、その排熱は地域の地域暖房に再利用されている。

これらのイニシアチブの統合は、環境への責任を維持しながら技術的進歩を目指す欧州の包括的なアプローチを示している。これらのプログラムは、以下のことを確実にするために連携している。

- 主権コンピューティング能力
- 持続可能なインフラ開発
- 競争力のある AI イノベーション
- 欧州の価値観と基準の遵守

この協調戦略により、欧州は AI 時代の持続可能な高性能コンピューティングのリーダーを目指している。

米国の取り組み

2025 年以降のモデルにおいて、米国はエネルギー安全保障、産業の強靱性、そして持続可能性を一つの戦略に結びつけている。天然ガス、原子力、再生

可能エネルギー、そして CCUS、水素、地熱、先進エネルギー貯蔵、SMR といった新興技術を含む、豊富で多様な供給は、長期的な安定性、短期的なシステム信頼性、そして脱炭素化に向けた着実な進展を確保することで、エネルギー安全保障を支えている。安定的で手頃な価格のエネルギーは重工業と中小企業を支え、AI、デジタル・ツイン、スマートグリッドといったデジタルツールは、業務の改善とシステムの強靱性強化に貢献する。脱炭素化は、CCUS や水素から AI 対応グリッドに至るまで、技術中立的なイノベーションを通じて推進され、競争力を損なうことなく排出量削減を実現する。米国は希少性や義務ではなく、豊かさ、強靱性、そして技術革新を通じて、産業と世界のリーダーシップを強化し、持続可能性を推進している。

////////////////////////////////////

6 未来の HMI

前回の日独プロジェクトで議論され提言したマルチバース・メディエーション(図 1)を実現するためには、技術的な問題だけでなく、各地域の文化的背景や経済状況も考慮し、ELSI を徹底的に検討し、そのためのステップを議論する必要がある。

例えば日本では、NEDO の SIP プログラムの一環として、HCPS (Human-Cyber-Physical Space) 協調ロボットの開発と社会実装が進められている[138]。このプロジェクトは、テクノピアサポート社会と呼ばれる、人間と技術が共生する社会の実現を目指しており、Society 5.0 の実現に大きく貢献する。具体的には、高齢者支援、社会的弱者支援、子育て支援などにより多様なライフスタイルに対応し、世代を超えた人々の自立と自由を高めることを目指し、2025 年度までに HCPS の基盤技術を評価して統合システムの運用評価を行う。そして、2027 年までに国内外 10 カ所以上で運用開始を目指し、最終的には 2033 年までに 30 カ所以上に適用拡大し、他の地域にも進出して持続可能な経済サイクルを確立する計画である。この活動では、日本各地の文化的背景や経済状況を考慮し、市民や社会的弱者の視点からも検討されるべきとの議論が高まっている。

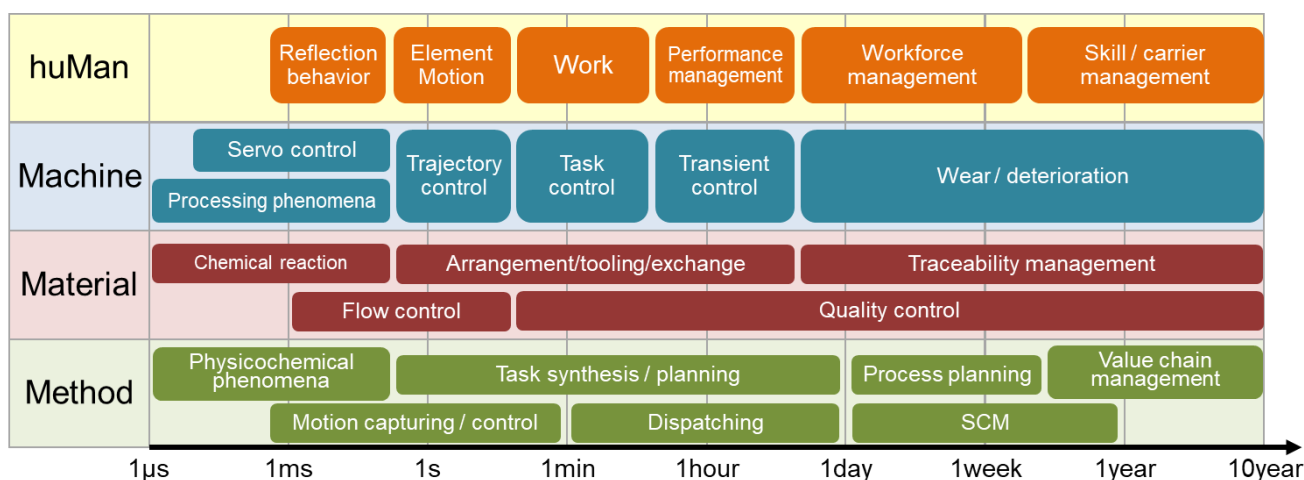


図 55 - HMI に関する現行技術の限界[147]

また、このように幅広い分野で産学官が連携すると、技術開発の取り組みが先行しがちになるが、技術の性能限界が HMI の要求をカバーしきれないという根本的な問題がある。つまり、AI を含む機械は、人の感覚や知識を模倣する能力、様々な文化的背景を持つ人の知識や経験を他の人間に伝達する能力をまだ有していない。図 55 は、横軸にマイクロ秒から数十年までの時間を対数で示し、HMI の 4 つの基本要素と言われる huMan、Machine、Material、Method の観点から主な挙動を示したものである。例えば、マイクロ秒の時間領域では、人の反射運動、化学反応、物理化学現象などがまだデータとして十分に形式知化されていない。また、数十年の時間領域では、長年蓄積された個人の知識や経験をどのように他の人間や機械に継承するか、機械の損耗をどのように長期的に監視するか、そもそもデータを数十年以上

に渡ってどのように維持・管理するかなど、多くの課題が残されている。

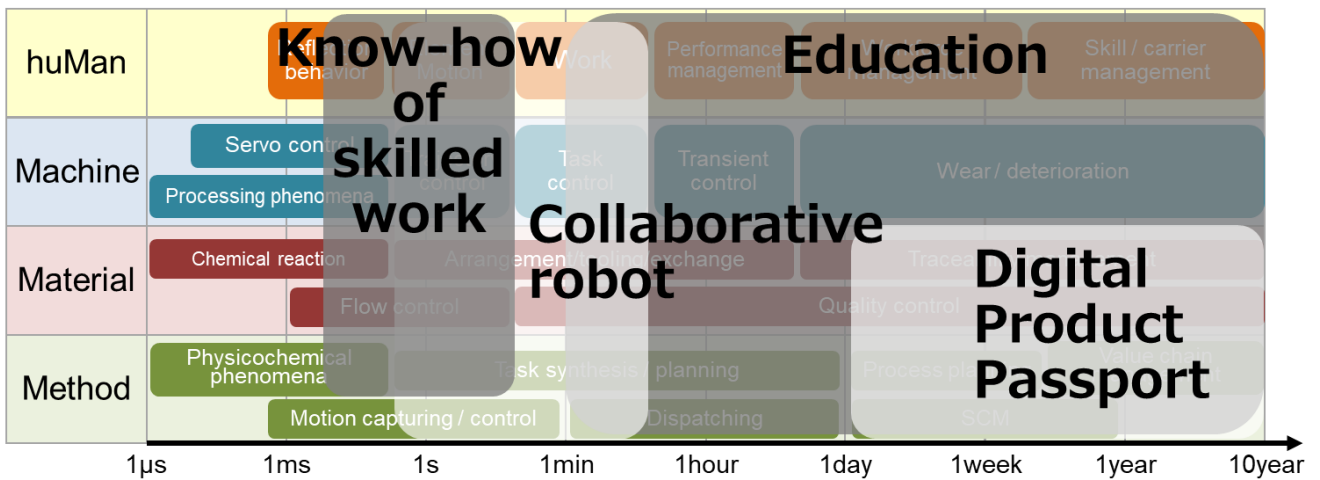


図 56 – HMI の取り組み例[147]

図 56 は、HMI の取り組み例を図 55 の上に重ねたものである。この図で重要なのは、どのイニシアチブも図の全体をカバーする技術的なカバレッジを持っていないということである。つまり、前回のプロジェクトで人と機械の共生のゴールイメージとして提言したマルチバース・メディアーションを実現するためには、複数の取り組みを有機的・体系的に組み合わせ、人間社会で適切に適用し、永続的に維持・管理していくことが重要である。日本の Society 5.0 や欧州のインダストリー4.0 において、System of Systems の概念が技術的のみならず社会的にも本質的に重要であり、国際的な連携が不可欠であることを繰り返し強調する動機のひとつはここにある。

【コラム】 米国の AI による製造業のレジリエンス強化

米国政府も、製造業のレジリエンスと持続可能性を強化するため、AI を活用したソリューションを積極的に推進している。2024 年 7 月 22 日、NIST は、米国の製造業における AI 技術の統合に特化した新たなマニュファクチャリング USA Institute を設立するため、最大 7,000 万ドルの資金を提供すると発表した[148]。このイニシアチブは、既存のマニュファクチャリング USA 研究所を基礎として、製造におけるダ

ウンタイムを削減し、資源の浪費を最小限に抑え、製造装置の寿命を延ばし、最終的にはより大きな持続可能性を促進する予知保全などに焦点をあてようとしている。この中で、生成 AI は予知保全を可能にすることで製造業のレジリエンスを向上させる上で極めて重要な役割を果たす。機械の状態や稼働状況などのマルチモーダルデータを分析して正確な故障予測を行ってメンテナンスの必要性を予測することで、製造

業者はコストのかかる機器の故障を回避し、ダウンタイムを減らし、製造装置の寿命を最適化することができる。このプロアクティブ・メンテナンス・アプローチは、新規設備の必要性を低

減するだけでなく、非効率的な機械稼動に伴うエネルギー浪費を減少させ、資源利用の最適化と環境への影響の最小化を通じて、産業の持続可能性の向上に貢献する。

.....

HMI に関する技術を社会適用するときの各地域の ELSI について、日本の Society 5.0 で議論されているトピックのひとつに、小林が 2018 年に提唱した仮説がある[149]。この仮説では、機械の知能化が進むと、AI を含む機械が仕事に必要な知識を蓄積して、その時々で役立つ知識を示す処理を人に代わって処理すると予測した。そしてこれは労働構造を変化させ、人間は機械に知識や指示を与える人間と、機械から指示を受け単純な肉体労働を行う人間に分かれると予測した。この仮説は、図 57 に示す三角形の中間の赤色の階層、例えば保険事務員や経理事務員などルーチンワークの多い中スキル労働者が AI を含む機械に取って代わられると示唆した。小林はこの階層構造を「洗練された奴隷制」と呼んだ。

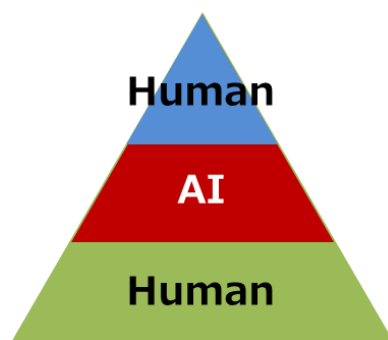


図 57 - 洗練された奴隷制[149]

この仮説は、これまで文化的な背景や経済状況の違いから労働力として参加することが難しかった人々が社会に参加できるようになる側面もあるため、この階層構造がただちに人々に不幸をもたらすわけではないと主張している。一方でこの仮説では、機械から指示を受けて単純な肉体労働をする人の収入は安くなり、機械に知識や指示を与える人間との経済格差は広がるという。この経済格差を鑑みても、労働としてこのヒエラルキーの最下層を選択することは必ずしも間違った選択ではないかもしれないと主張している。つまり、AI の指示に 100%従わなければならない仕事は、判断や迷いが必要なく、職業的ストレスの少ない仕事と言えること、AI の「上司」はセクハラやパワハラとは無縁であること、法律を遵守するようにプログラムされている限り、違法な残業を指示することはないからだと主張している。

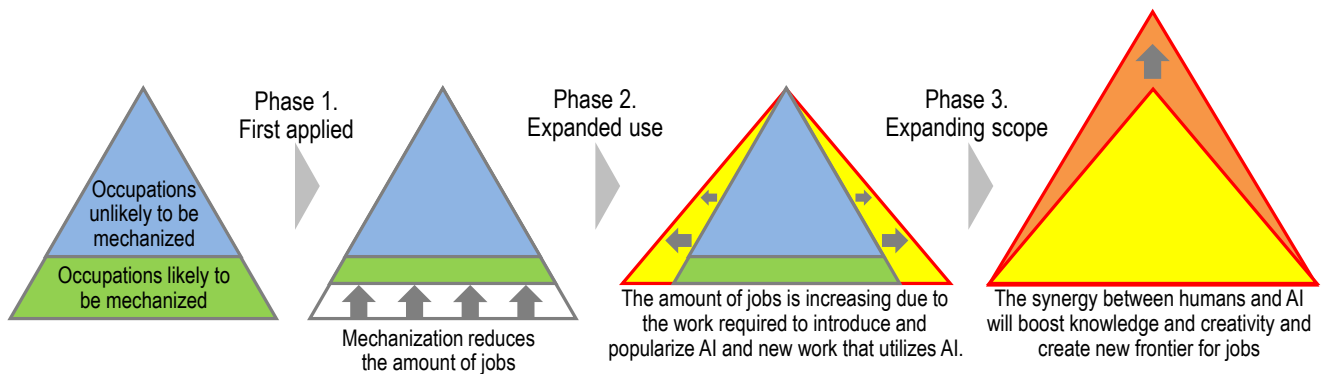


図 58 - AI 導入による仕事の進化

総務省 2018 年版情報通信白書の図 4-5-2-1 「AI 導入による仕事の変化」[150]を基に筆者ら作成

同様の議論は、Society 5.0 実現の要件として総務省でもなされている。図 58 は、AI の導入による仕事の変遷を示したもので、左端と中央の 2 つの図は、総務省の 2018 年版情報通信白書[150]の「図 4-5-2-1 AI 導入による仕事の変化」から引用したものである。それによると、左端の図のように、労働構造は機械化されそうな部分（図の下側の緑色の部分）と機械化されそうにない部分（図の上側の青色の部分）に分類することができ、AI の適用により、左から 2 番目の図のように、緑色の部分が機械に置き換わり、人の作業が減少していくと予想した。さらに、左から 3 番目の図のように、AI の導入・普及に必要な作業や AI を活用した新たな作業によって、労働市場全体としては拡大するとした。一番右の図は、本書で取り上げた HMI が人の知識や創造性をさらに拡大し、まったく新しい産業や仕事を開拓し、職場を新しい労働構造に変えていくことを予測したものである。さらにこの先では、「洗練された奴隷制」で議論されたように、機械の領域は、より高いレベルから知識や指示を提供する知的労働の領域を侵食していこう。既に、株価、為替レート、企業業績、交通渋滞、天気などのビッグデータの分析に基づく統計的予測は AI の得意分野であり、遅かれ早かれ人の予測能力を凌駕するだろう。

大事なことは、「洗練された奴隷制」のような社会の階層構造をディストピアと呼ぶべきか、ユートピアと呼ぶべきかという二元論的な議論をするよりも、こうした思考実験に基づく未来予測があり、人々が幸せに暮らせる持続可能な社会システムとはどのようなものであるべきか、HMI とはどのようなものであるべきか、について議論することである。

図 59 は、「洗練された奴隷制」が提言された前年の 2017 年にマッキンゼーから出版されたレポートに掲載された図である。このレポートでは、2016 年から 2030 年にかけて、認知スキルのような中程度のスキルを必要とする労働は機械に取って代われ衰退し、専門的な知識を必要とする労働は増加すると予測している。また、より低いスキルを必要とする労働は減少するか、わずかに増加すると予測している。すなわち、AI を含む機械の普及によって労働の二極化が起こる時点を予測するという点で「洗練された奴隷制」と方向性が一致している。

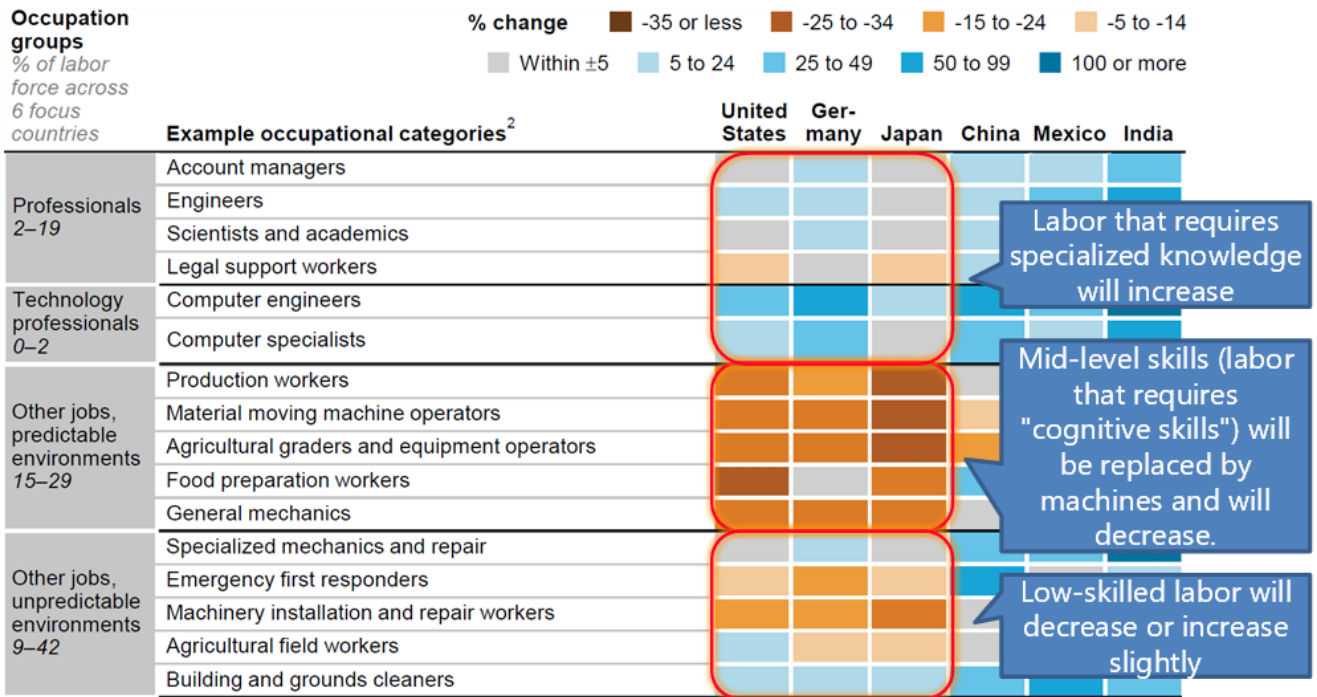


図 59 - 失われる雇用、増える雇用：自動化の時代における労働力の変遷[151]

労働の二極化については IMF 報告書でも指摘されている[152]。図 60 は、1995 年から 2009 年までの期間において、労働分配率の全体の変化とスキルの関係を示したものである。ここでは労働を「高スキル」「中スキル」「低スキル」の 3 つに分類し、労働分配率の変化の主因がそれぞれのスキルにどの程度影響しているかを示している。この図では、高スキルの労働分配率の上昇と低スキルの労働分配率の低下は高度教育政策によるものであり、中スキルの労働分配率の低下は技術革新とグローバル・バリュー・チェーンの統合によるものであるとしている。すなわち、教育の高度化とグローバル化によって中スキルの労働が減少し、AI を含む機械がその仕事を代替することは、人間社会の発展と維持の観点から避けられないのである。

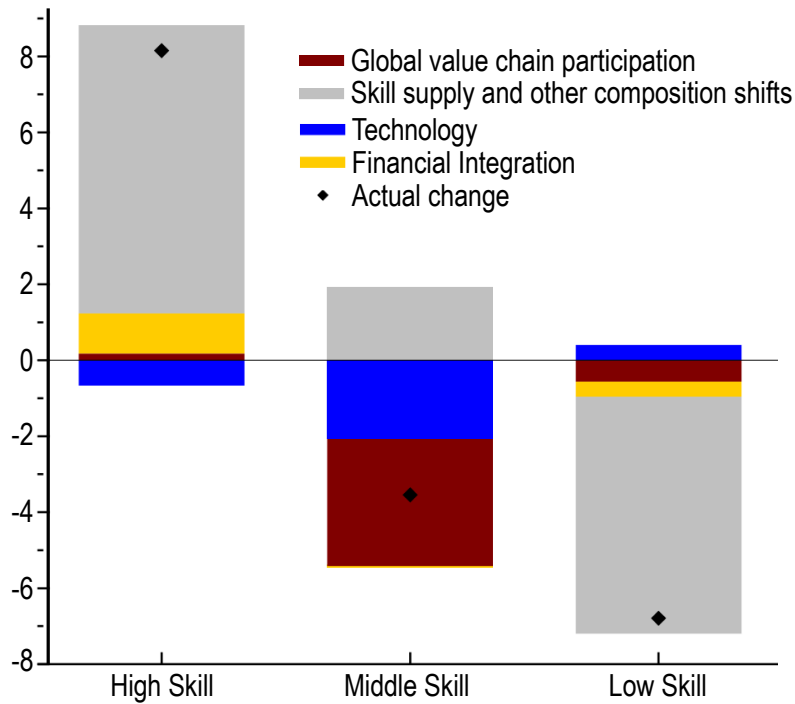


図 60 - 労働分配率の変化とスキルの関係 (1995-2009 年) [152]

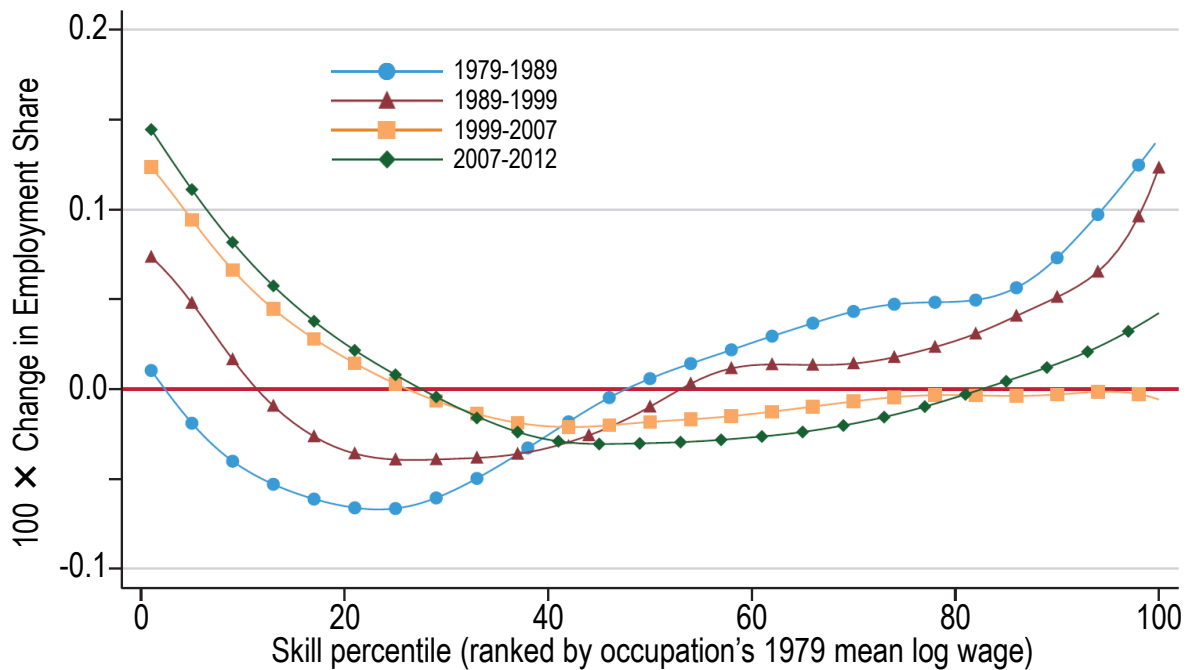


図 61 - 米国労働市場におけるスキル・パーセンタイルと雇用占有率の変化 (1979 年～2012 年) [153]

スキルレベル別の労働構造の変化については、マサチューセッツ工科大学 (MIT) の経済学者デビッド・オーターによる米国の労働市場を分析した有名な論文がある[153]。その代表例

が図 61 である。縦軸は雇用占有率の変化のパーセント、横軸は 1979 年の平均対数賃金でランク付けされたスキル・パーセント、そして複数の折れ線グラフが各年代の状況を示している。この図から、米国のスキルレベル別労働構造は、徐々に低スキル労働と高スキル労働に二極化していることがわかる。

さらに、図 61 に基づいたときの労働構造の現在と将来のイメージを図 62 に示す。この図で議論すべきは、HMI のあるべき姿が労働構造の変化にどのような価値をもたらすかということである。

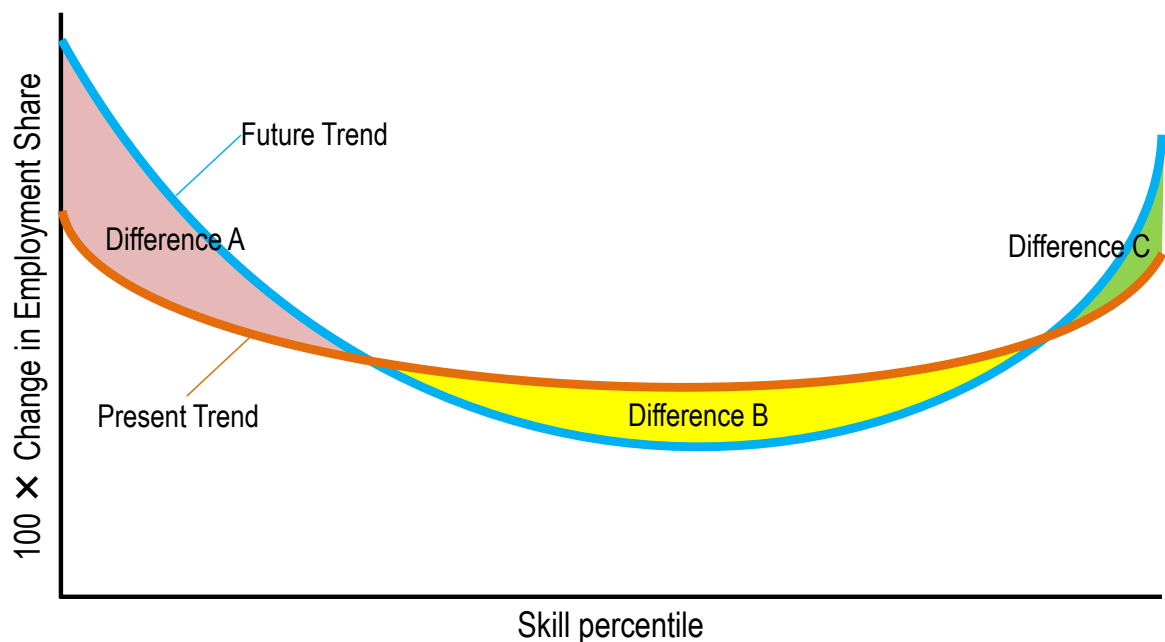


図 62 - 図 61 に基づく労働構造の現在と将来のイメージ[147]

図の左上の赤い部分「差分 A」は低スキル労働の増加、図中央の黄色い部分「差分 B」は中スキル労働の減少、図右上の緑の部分「差分 C」は高スキル労働の増加を表している。そして、これまで述べてきたように、自動化やデジタル化が社会に浸透するにつれて、差分 A が生じる。差分 B は、グローバル・サプライチェーンの構築・運用による経済のグローバル化によって減少するだけでなく、AI を含む機械に人間が取って代わられることによって生じる。また、一部の高度な技術開発によって、人の活動や知識が機械の助けを借りてさらに拡大することで差分 C が生じる。

図 62 の労働構造の変遷について、図 63 に示すように 2 つの論点がある。第一に、差分 B で職を失った労働者が、差分 C に移動して活躍するにはどうすればよいか、第二に、差分 B で職を失った労働者も移動する差分 A で、人間がいきいきと社会参加できるようにするにはどうすればよいか、である。

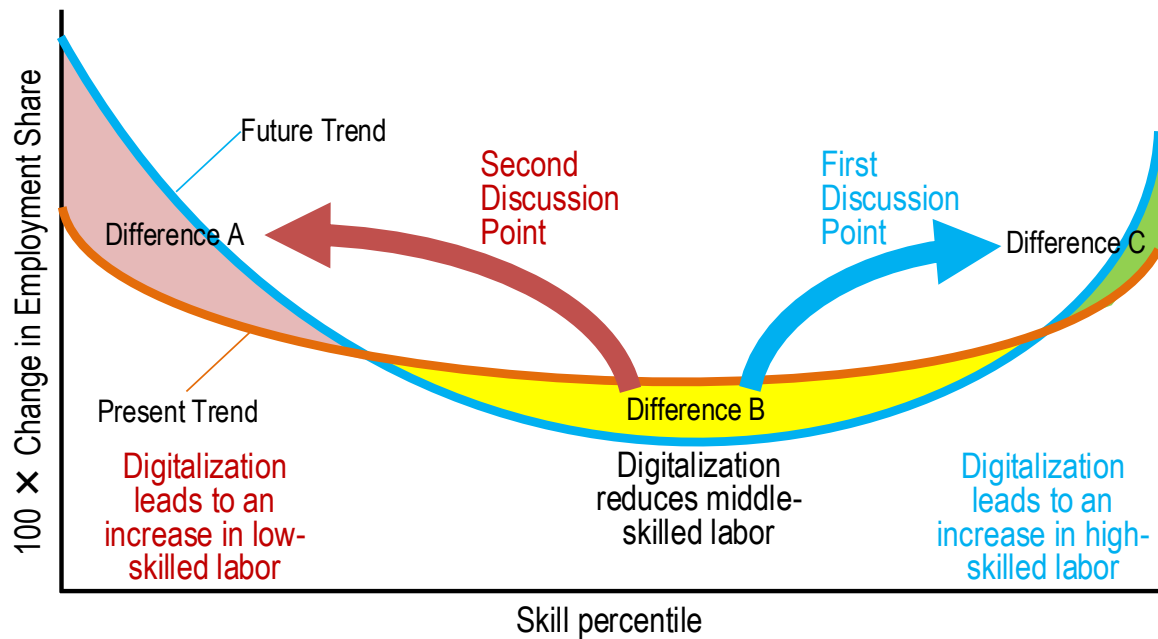


図 63 - 2つの論点[147]

図 63 にある青矢印のような第一の論点については、デジタル化によって差分 B のデータ入力やチェックなどの中スキル労働が減少するため、生涯教育などを通じて差分 C の高スキル労働に移行させる必要がある。そのためには、人間や社会の進化に合わせてアップデートされる STEM 教育、多様な価値観や能力を育む生涯教育、個人の成長や状況に応じた個別教育など、様々な施策の拡充が必要である。これは、製造・小売・サービス現場における OJT (On-the-Job Training) の観点からも重要であり、個人の成長や状況に応じた適切な気づきやノウハウを効果的・効率的に提供する必要がある。

先進的な HMI は、個人の成長や状況に合わせた教育・気づき・ノウハウの提供に貢献することが期待されている。現在でも教育分野では、小中学生にタブレット端末を配布するなど、インターフェースの充実が広がっており、個人の成長や状況に合わせた教育が始まっている。また、製造業や小売業などのサービス分野では、作業内容の確認や完了報告だけでなく、作業時の注意喚起や過去のトラブル事例の閲覧など、タブレット端末を活用した取り組みが始まっている。

また、生成 AI を活用したプログラミングの自動化は、エンジニアの仕事をより生産的で創造的なものに変えていくカギになりつつある。短期的には、このプログラミングの自動化はエンジニアの労働を奪うかもしれない。しかし、中長期的な視点に立てば、これまで培ってきたドキュメントやソースコードの再利用をさらに促進し、エンジニアの労働を本質的な業務に集中させることが可能となり、HMI を基盤とした産業の持続可能性に貢献する重要なイネーブラーになるはずである。

すなわち、第一の論点において、今、世界で求められているのは、差分 B で職を失った中スキル労働者を、差分 C で高度スキル労働者に移行させるための体系的な課題抽出と対策である。

次に、図 63 にある赤矢印のような第二の論点については、差分 A における清掃などの単純作業の低スキル労働がなくなるわけではなく、図の赤矢印のように、差分 B における中スキル労働の減少による労働者が、差分 A における低スキル労働に移動する可能性があることをどうするかということである。

この第二の論点として、以下の 2 点を強調したい。

第一に、低スキル労働の大半は、それほど収益性の高い労働ではないものの、社会を支えるために必要不可欠な労働である。近未来を見据えた場合、関係する技術の成熟度の不足とコストの高さから、この労働を完全に自動化することは難しいかもしれない。すなわちこの労働への人間の参加はこれからも続き、場合によっては機械との様々な協働が必要となる。

第二に、そもそも、人の能力や嗜好は多様であり、高スキル労働だけでは捉えきれない。社会の持続可能性と幸福のためには、すべての人間が社会の役割に参加することで、心理的満足感をもって受け入れられなければならない。そのためには、低スキル労働に対する考え方自体を見直すことが重要である。

つまり、デジタル化によって社会を変革し、産業の持続可能性を確保するためには、低スキル労働における人と機械の協働が最重要課題であり、この問題をいかに解決し、低スキル労働者がいきいきと社会参加できるようにするかが今後の本質的な課題である。

この観点からの議論は、まだどの国でも進んでいないようだ。少なくとも、差分 B で職を失った労働者も差分 A に移行する社会では、人がいきいきと社会参加できるように、多様な価値観や多様な働き方を受け入れる社会システムの構築が重要なはずである。そのためには、労働と雇用のマッチングをさらに細かくダイナミックに進化させることで、働きたい人が適切な労働環境・条件のもとで好きなだけ働ける社会システムを実現する必要がある。

また、そうした労働力だけではカバーしきれない雇用に着目し、自動化を推進する仕組みづくりも必要だ。その観点からは、現在世界中で研究開発が進められている高度で集約されたヒューマノイドロボットでは解決できない可能性がある。人間が熱意を持ってできない単純な繰り返し作業とは何か、それを低コストで人間と同等以上の品質で自動化するためにはどのような方策があるのかという視点から、国際的にこの問題に取り組む必要がある。

~~~~~  
**【コラム】 中スキル労働市場の役割と技術変化への対応**

中スキル労働者は社会と経済において重要な役割を担っており、今後も完全になくなることはないだろう。この市場は、大卒者を含む多くの人々の生活の基盤となっている。しかし、これらの労働者の多くは常に雇用喪失の脅威にさらされ、ルーチンワークに支配

された生活を送っている。

この労働市場の役割を再評価し、AI や自動化技術がどの程度代替できるかを分析することは重要である。具体的には、AI によって代替可能なものと代替不可能なものの分類定義、そしてその判断要因が社会的な理由によって地

域毎に変化したり時代で変化したりするメカニズムを明確にする必要がある。日米欧では中スキル労働市場に焦点を当てた研究が進んでおり、これらの知

見を活用し、労働市場の変化に適応するための戦略を検討することが不可欠である[154][155][156][157][158]。

////////////////////////////////////

上記 2 点の議論に関して、資本主義の視点から生み出された雇用や技術では、このような社会システムの要件をカバーできない可能性があるため、公共機能としての新たな HMI を含めた新たな社会インフラの構築が必要となる。

すなわち、図 55 に示すように、時間的・空間的に圧倒的に広いダイナミックレンジで知識や経験を共有し、創造性を含めた人の能力を大きく拡張できる社会システムをいかに構築していくかが課題の一つである。一方、現実の世界に目を向けると、文化の違いや経済状況の違いから、それを実現するための方法やステップは地域によって異なるはずである。従って、国際的に議論・協力すべきは、この問題のゴールイメージを決めるだけでなく、ゴールイメージに到達するための施策をどうするかも含まれるべきである。

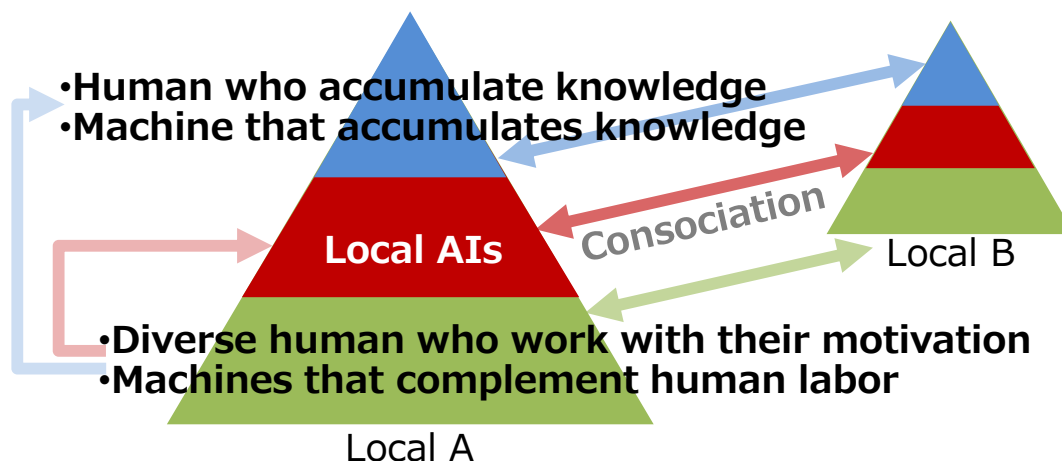


図 64 - ハーモナイズド共生社会[147]

図 57 に示した「洗練された奴隷制」の議論で提案されているような、人の労働を機械と人が分担する社会ではなく、固有の文化や経済状況を持つ各地域が有する法律や基準に基づいて、人も機械もそれぞれの機能で知識や経験を蓄積し、それを各地域の法律や文化的背景に応じて有効に活用するシステムを構築することが重要であるはずだ。すなわち、現実の社会は文化も経済状況も異なる多様なものであり、労働のノウハウも業種ごとに異なるため、単一のデータスペースや AI でこの目的を達成できるとは考えられない。図 64 に示すように、

私たちはこのイメージを「ハーモナイズド共生社会」と呼んでいる。

この図において、ローカル A とローカル B は、人と機械が協働する別々のエコシステムを形成していることを表している。「ローカル」とは、異なる国や文化圏だけでなく異なる産業分野も指している。それぞれのローカルでは、AI とそれを活用する知的機械が人間社会に貢献し、多様な人間が意欲を持っていきいきと働き、人間の労働力では賅いきれない労働力を機械が補う。さらに、こうした人と機械の労働を通じて得られた経験や知識は、各ローカルで開発運用される AI で活用される。

そして、ローカル B のような国や産業分野の異なるローカルとは、社会的なルールや規制、基準に基づいた「緩やかな連合」を形成し、各ローカルの独自性や特殊性を維持しつつ、全体として持続可能な人間社会を形成する必要がある。

実施にあたっては、各地域の ELSI を考慮し、既存の資産や経済状況を盛り込んだ適用計画を策定しなければならない（付録 C）。

上記の課題意識とビジョンで、私たちは、環境、幸福、経済成長が調和したハーモナイズド共生社会の実現に貢献することを目指している。

#### 【コラム】 メタモデルを活用した知識の再利用による、DX 事例の適用拡大

本書で述べてきたように、各地域が抱える課題は多様化・複雑化している。世界のどこかで成功した DX 事例は、単なる成果ではなく、他の地域にも価値を提供できる貴重な資産として扱うべきである。つまり、成功した DX 事例をいかに世界に再利用するか、そのための技術や社会的受容をどうしていくかが、世界的に喫緊の課題となっている。

DX 事例において、DX の本質的な部分は共通であっても、地域ごとの ELSI を考慮した形で、ステークホルダー間の因果関係を分析し、インターフェースやオペレーションを地域ごとにローカライズする、システムズエンジニアリングによるアプローチが注目されている。

DX 事例を他の地域に拡大するためには、システムエンジニアリングのアプローチで、それぞれのケースで使われた個々の知識をモデルとして抽出し、体系化することが重要である。ここで重要なのは、“メタモデル”の活用である。メタモデルとは、システムモデリング言語 (SysML)、統合モデリング言語 (UML)、ビジネスプロセスモデル・表記法 (BPMN) などで記述される特定のモデルを作成するための構造、ルール、構文、セマンティクスを定義した高度のモデルのことである。メタモデルを使用することで、特定の環境やドメインで知識を表現するモデルを、他の環境やドメインに適した形式に変換することができ、図 65 に示すように、異なるユースケースにまたがって再利用可能な知識として適用すること

ができる。

今後、メタモデルを利用した知識再利用の仕組みは、より幅広い業界やビジネス領域に広がっていくことが予想される。例えば、製造業、物流業、金融業、サービス業、公共部門など、各業界に最適化されたメタモデルを開発することで、各分野における知識の共有と水平展開がさらに促進されるだろう。

また、AIなどのデジタル技術を活用し、現場のノウハウや知見を自動的に抽出・モデル化し、メタモデルによる知識再利用の仕組みを導入することで、

知識の属人化を防ぎ、効率的な蓄積・再利用を実現することが可能となるだろう。

一方で、知識を表現するモデルの抽象度の適正化、メタモデル設計の難しさ、現場での定着、個別要求への柔軟な対応など、解決すべき課題も多く残されている。これらの課題を解決するためには、メタモデル設計のガイドラインやテンプレートの整備、知識共有ツールの導入、現場担当者の教育・支援体制の強化など、各地域が協力して共通の仕組みを作ることなどが今後の課題となっている。

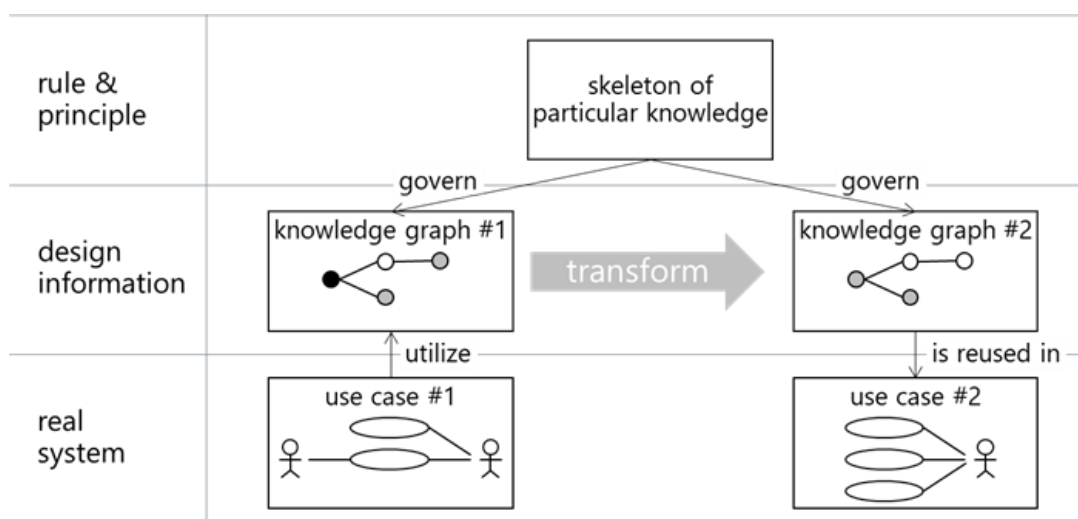


図 65 - メタモデルによる蓄積された設計情報の再利用の例[159]

.....

## 7 提言

本書では、労働構造の変化、働き方の進化、脱炭素化やマイクロプラスチック問題など産業活動が環境に与える影響といった重要な課題に取り組んで産業の持続可能性を実現しようとしている日米欧の現状をみてきた。

この議論から浮かび上がってきたのは、これらの複雑な問題に対処するための重要かつ統一的なフレームワークのひとつとしての HMI の役割である。この視点に基づき、スマート製造に携わる企業経営者、政府の政策立案者、労働の未来と産業の持続可能性に注目する研究者を対象に、以下 3 つの戦略的提言を提示する。これらの提言は、持続可能で包括的な産業発展に貢献するために、人と機械の協業の進化を促すことを意図している。これらの提言は、イノベーション、労働者の公平性、環境への責任に根ざした、より公平で強靱な労働の未来を実現するための日米欧の進むべき道を示すものである。

### 7.1 第一の方向性（提案 1）

#### DX による人間中心の仕事の強化

**自動化や AI などのデジタル技術が世界の労働市場を刷新する中、持続可能で公平な、人間中心の産業システムにおける労働の役割を再定義する必要性が高まっている。これらのデジタル技術は、単に労働力を代替するのではなく、人の能力を増強し、有意義な雇用へのアクセスを拡大し、労働への参加意欲を高める可能性を秘めている。この方向性において、我々は、人々が安全で、包括的で、目的志向的な環境の中で熱意を持って働くことができる産業社会を構築するための課題と解決策を明らかにするための国際的な協業を提案する。**

生成的 AI、自動化、スマートシステムなどのデジタル技術は、労働市場を急速に再形成し、雇用の二極化を加速させ、労働の本質を根本的に変容させている。本書では、生産のデジタル化、バリューチェーンのグローバル化、人口動態の変化、自動化の加速といった世界的なメガトレンドを検証し、労働を 3 つの領域に分類した。(1)限られた訓練しか必要としない単純労働(低スキル労働)、(2)体系化された教育と経験を通じて開発できる熟練労働(中スキル労働)、(3)高度に創造的で分析的な労働(高スキル労働)、である。我々の調査結果は、自動化と AI が多くの中スキル労働を急速に変容させ、あるいは置き換えている一方で、高スキル労働の認知的役割と低スキル労働のサービスの役割の両方に新たな需要を生み出し、労働市場の二極化に寄与していることを示す最近の研究と一致した。

特に生成 AI は、2030 年までに現在の労働活動の最大 30%を自動化すると予想され、主に定型的な事務、管理、顧客サービスの役割に影響を与える一方、STEM、ビジネス、法律、ヘルスケアなどの知識集約的な職業の生産性を高める。同時に、社会基盤、クリーン・エネルギー、製造業の近代化への投資は、特に日米欧において新たな職業とスキルに対する需要を生み出すだろう。しかし、こうした新たな役割は、現在の労働力の地理的・人口的分布と一致しない可能性がある。

持続可能で包括的な移行を支援するために、我々は以下の戦略的行動を勧告する。

- 製造業とサービス業に人間中心の設計基準を導入し、HMI システムが労働者の自律性、創造性、学習、目的を高めるようにする。
- 動的なタスクの割り当て、フィードバック、および人間と AI のコラボレーションのためのデジタル・プラットフォームを活用することで、低スキルの職種であってもモチベーションと仕事への満足度を高める。
- 個人の適性、ライフステージ、地域の労働需要に合わせて AI を活用した教育・スキルアッププログラムを調整し、生涯学習を長期的な雇用のレジリエンスの原動力に変える。
- スキルベースの雇用を拡大し、包括的なデジタル・リテラシー・プログラムを推進することで、十分なサービスを受けていない人々の参入障壁を低減する。

重要なことは、自動化と AI の恩恵を最大化するには、労働を単に最小化すべきコストとしてではなく、社会の幸福、イノベーション、経済のレジリエンスの源泉として捉える必要があるということである。マサチューセッツ工科大学（MIT）の経済学者デビッド オーターが指摘するように、機械は定型的な仕事を代替する一方で、判断力、適応力、創造性といった人間特有の能力を補完し向上させる。したがって、かつて価値が低いとみなされた役割であっても、公平性と尊厳を念頭に置いて設計されれば、人の参加を増やすことは、最終的に長期的な持続可能性を高めることになる。

この変革は国ごとに限定されたものであってはならない。むしろ日米欧が国際的に協力する重要な機会なのである。私たちは共に責任ある AI の配備、協調的な労働力政策、国境を越えた知識交換の枠組みを構築し、たとえその構造が進化しても、労働が人の経験の中心的かつ充実した一部であり続けることを保証することができる。

## 7.2 第二の方向性（提案 2）

### 機械が支えるべき本質的労働

**自動化と AI が労働環境を再構築する中、持続可能な産業発展のために極めて重要な優先事項は、特に提案 1 で特定された中スキルの労働の職種の減少と二極化に照らして、人間の労働だけでは充足することができない社会的に不可欠な労働のカテゴリーを定義し支援することである。これらの役割には、産業の持続可能性と社会のレジリエンスに直接貢献する公共サービスや環境サービスが含まれる。**

社会的に不可欠な労働の多くは、産業のレジリエンスと社会の福利の基盤であるにもかかわらず、過小評価されたままである。これらの役割は、労働集約的で低賃金であることが多く、文脈判断力、共感力、適応力に依存するため、完全に自動化することは困難である。しかし、労働者を置き換えるのではなく人の強みを補強するように HMI を設計した場合、的を絞った HMI サポートから恩恵を受ける大きな可能性を秘めている。

プラネタリー・バウンダリーの範囲内で社会的なウェルビーイングを達成するためには、人と機械の分担を体系的に評価することが不可欠である。この評価は、技術的な実現可能性

と自動化の社会的な望ましさのバランスをとり、人の尊厳とコミュニティのレジリエンスを損なうのではなく、むしろサポートするようにしなければならない。機械は単に労働を代替するのではなく、特に人の労働が不十分、望ましくない、あるいは非効率的な領域において、労働を補強・補完するものでなければならない。例えば、リサイクルにおける原料の選別、環境浄化、データ集約型のモニタリングなど、反復的で危険な作業は、人間中心の雇用基盤を侵食することなく、AI やロボティクスによって効果的に対処することができる。

この提案の核心は、技術革新を人の価値観や社会の優先事項と一致させる必要性である。将来の人材育成戦略では、雇用を奪うものとして機械を配備するのではなく、人の能力を拡大し、必要不可欠なサービスの範囲を広げ、高齢化、環境悪化、医療制度への負担など、現代の複雑な課題に取り組む幅広い参加を可能にするツールとして扱わなければならない。HMI の思慮深い統合によって本質的な労働力を高めることで、これらのイニシアチブは、社会的に重要な役割を、持続可能で影響力の大きいキャリアパスへと転換し、同時に公共の成果を向上させ、地域経済の活性化を支援することができる。

このような背景から、日米欧の専門家が地域横断的に協力し、必要不可欠な労働カテゴリーを特定し、機械と人の分担を最適化し、インクルーシブデザインの原則を HMI 技術に組み込むためのフレームワークを共同開発する可能性は大いにある。多様な産業、文化、地政学的背景の中で、この変革を公平かつ効果的に進めるためには、知識とベストプラクティスの共有が不可欠である。

## 7.3 第 3 の方向性（提案 3）

### 人と機械のコラボレーションのための ELSI

AI、自動化、HMI の統合がグローバルな産業システム全体で深まるにつれ、異なる地域で発生する ELSI に対処することがますます不可欠になっている。本提案では、持続可能で公平な産業発展のために、包括的で相互運用可能なシステムを設計できるよう、特に提案 1 と 2 に関連する日米欧の ELSI の懸念を特定、分類、調整する必要性を強調する。

生成 AI、ロボティクス、自動化が牽引する先進的な HMI システムの急速な普及は、文化的価値観、規制の枠組み、ガバナンスの理念の違いにより、地域によって異なる深刻な ELSI を提起している。これらのテクノロジーが高精度の作業と低複雑度の作業の両方を再構築するにつれ、雇用の転換、アルゴリズムによる意思決定における公平性、データプライバシー、多様な労働市場の長期的な社会的結束に関する新たな倫理的懸念が浮上してくる。

ブルッキングスやマッキンゼーの調査によると、生成 AI は職業スキルの要件を大きく変え、定型的な認知労働の需要を減らす一方で、高度な認知能力、技術力、社会的情緒的能力への依存を高めるという[160][161]。こうした移行は、従来のコンプライアンス・モデルだけでは責任を持って管理することはできず、むしろ、適応性があり、包括的で、地域に配慮した新しい倫理の枠組みが求められる。例えば日本の Society 5.0 では AI を人の幸福や社会的包摂と調和させることを強調している[31]一方で欧州では信頼、透明性、説明責任に焦点を当てた予防的な法的枠組みをしばしば採用している[162]。これとは対照的に米国では、NIST AI リスク

管理フレームワーク[163]などのイニシアチブを通じて責任ある AI ガバナンスへの関心が高まっているとはいえ、イノベーションと市場主導型の採用を重視している。

人と機械の共生のためのレジリエントなアーキテクチャを構築するために、将来の産業システムは以下の 3 つの重要な基準を満たさなければならない。

1. 人間中心の設計：尊厳、自律性、多様性の原則をシステム設計に組み込む。生成 AI を含む HMI 技術は、人の可能性を補強するものであって、取って代わるものであってはならず、労働力の移行によって居場所を失った人々を含むすべての人が、意味のある、一致した役割を見出せるようにする必要がある。
2. 分散型ガバナンスモデル：多様な規制環境を考慮すると、ELSI の検討はモジュール化され、データ保護、安全性など共通の懸念事項に対処する一方で、自動化や AI の倫理に対する地域ごとの態度を反映できる柔軟性を持たせる必要がある。システム・オブ・システムズアプローチにより、グローバルな規範と各国の規制の両方を尊重しながら、地域ごとの導入を可能にする必要がある。
3. 透明性、説明責任、データ主権：HMI システムには、説明可能性、監査可能性、人間による監視のためのメカニズムが含まれていなければならない。トレーサビリティと介入権の確保は、信頼、労働者の主体性、規制当局の信頼を強化する。

これらの基礎的要素に加え、経済的公平性を ELSI ガバナンスに統合する必要がある。生成 AI がダイナミックなスケジューリングと自律的なオペレーションを可能にすると同時に、経済的価値がどのように生み出され、共有されるかを変革する。新たな価値の流れが公平に分配されない場合、特にインテリジェント・システムを設計する人々と、その処理結果を受け取る人々の間で不平等が拡大するリスクがある。

## あとがき

日米欧など先進諸国は人口ボーナスによる経済成長の機会の時期は過去のものとなり、直近 10 年間にわたってデジタル化を社会の成長ドライバーとして産学官共同で積極的な活動を進めてきました。

COVID-19 パンデミック後の世界を生きる現在の私たちは、デジタル化の取り組みの成果を享受するどころか、台風・洪水・干ばつなど環境災害の深刻化、マイクロプラスチック問題など人工物による環境汚染の深刻化、自国第一主義をはじめとした地政学的リスクの実体経済への影響など、まさに「ポリクライシス」に陥っています。

私たちは、過去 10 年間のデジタル化の取り組みを一旦総括し、持続可能な産業や社会の実現に向けて反省すべきことは反省し、環境、社会的な幸福、経済成長が調和した社会を実現しなければなりません。

日米欧の協力は、高度な HMI システムの台頭がもたらす経済的、倫理的、法的、社会的な複雑性に集団で対処するまたとない機会を提供できるはずで、このパートナーシップを通じて、両地域は、透明性、説明責任、アルゴリズムによる公正さ、データガバナンスといった基本原則を一致させるための合同 ELSI タスクフォースを設立することが可能となります。さらに、国際的な知識共有プラットフォームを構築することで、連合 AI システムを通じて、各地域が規制の自主性を維持しつつ、共有された基準に基づいて運用することが可能となり、集合的な学習、積極的なリスク軽減、AI 技術の責任あるグローバルな拡大が促進されることが考えられています。

本書の読者の皆様にも、今後の議論や活動に積極的に参加していただければ幸いです。

## 付録 A. 欧州 RoX プロジェクト：データ駆動型ロボティクス

RoX (AI ベースのロボティクス) は、先進的な AI とロボティクスを組み合わせ、強化された知覚、認知的意思決定、シームレスな人間とロボットの共同作業が可能な、適応性のあるインテリジェントな製造システムを構築する欧州の変革的な自動化プロジェクトであり、柔軟で効率的かつ安全な自動化ソリューションを通じて生産環境に変革を起こすことを目指している。

ロボットシステムの包括的な利用は、製造業や、積み下ろし、オーダーピッキングなど大規模な物流の作業やサービス要素を持つ企業など、多くの産業の大幅な強化を可能にする。その結果、ロボットシステムの市場は、将来的に極めて大きな成長が見込まれる。例えば、先進的なロボット部品の開発、AI の広範な利用、技術革新サイクルを短縮しシステム統合と試運転を改善するデジタル・エコシステムの可能性などである。RoX プロジェクトでは、産業界のパートナーと科学的パートナーからなるアプリケーション指向の産業コンソーシアムによって、この課題に取り組んでいる。

ロボットソリューションにおける AI ベースの技術と DevOps など反復開発アプローチなどソフトウェア領域の開発に重点を置いているため、RoX プロジェクトは、クラウド/エッジ環境における複雑で多様なツール群を統合して実装される、データ中心、データ主導、AI 主導のアプローチに焦点を当て、価値を創造しようとしている[164]。この点において、新たなビジネスモデルの確立と革新的な製品アイデアを持つ企業の新たな参入を可能にしている。

### Digital Ecosystem for AI-based Robotics – Use-Case Driven

- Loading & Unloading  
... covers truck loading and unloading processes, load carrier stacking tasks and autonomous outdoor transport
- Picking & Kitting  
... relates to single item picking and palletizing in order fulfilment processes in warehouses and in assembly fulfilment in production
- Production  
... addresses the automation of (high-mix, low-volume) production using multifunctional robot assistants for various standard tasks
- Commissioning  
... the focus is on using AI to speed up and reduce costs during the commissioning or reconfiguration of robotic systems and applications



Bernd Kuhlentötter, ABB AG, Q1 2025



図 66 – RoX での AI に基づいたロボティクスのためのデジタル・エコシステム [164]

## 付録 B. 米国における協働ロボットのインパクト

協働ロボットは、人間と共に安全に作業し、様々な産業プロセスにおいて効率、精度、柔軟性を高めることで、持続可能な製造業に革命をもたらしている。マテリアルハンドリングでは、部品のピッキング、配置、運搬などの作業を自動化することでワークフローを最適化し、手作業を減らしてミスを最小限に抑えている。人と機械の間の補完的な強みを統合することによって 5kg までの可搬重量に関わる作業が 2024 年に最大の収益を生んだ[136]。米国の協働ロボット市場は、2024 年に 2 億 8,400 万米ドルの収益を生み出し、2030 年には 14 億 1,150 万米ドルに達すると予測され、2025 年から 2030 年にかけて年平均成長率 29.5% で成長すると予想されている。

これらの進歩は、特に持続可能な目標に関連する製造プロセスを再構築し、より効率的な資源利用、プロセス精度、業務効率、意思決定の強化を可能にしている。協働ロボットは、組立・分解作業における部品のアライメント、締結、修理や再製造のための製品分解において精度を確保する一方、反復作業への適性がネジ締めや溶接のようなアプリケーションの精度を向上させる。さらにピック・アンド・プレイス作業では工程間で部品をシームレスに移動させることで生産ラインを加速し、スループットと一貫性を向上させる。このようなマテリアルハンドリングや組み立てにとどまらず、溶接、研削、研磨、バリ取りなどの高精度アプリケーションでも重要な役割を果たしている。品質管理と検査では、高度なセンサーとビジョンシステムを搭載した協働ロボットがリアルタイムの欠陥検出を可能にし、製品のコンプライアンスを保証している。

協働ロボットは、自動化、効率化、職場の安全性を向上させることで、幅広い産業を変革している。自動車製造では、協働ロボットが組立、溶接、塗装、品質検査を支援し、精度と生産性を確保している。エレクトロニクス業界では、回路基板の組み立て、マイクロ溶接、テストなどの繊細な作業を協働ロボットに頼っている。金属や機械加工では、工作機械の補助、研削、研磨、ダイキャストに広く使用され、ワークフローを最適化し、手作業を減らしている。プラスチックとポリマーの分野では、射出成形、トリミング、品質管理で協働ロボットが統合され、一貫性を確保し、無駄を最小限に抑えている。製造業にとどまらず、協働ロボットは食品や飲料の包装、選別、品質検査、家具や機器の製造における穴あけ、締結、組み立てなどでも重要な役割を果たしている。ヘルスケア分野では、協働ロボットが医薬品包装、検査室自動化、患者支援をサポートし、業務効率を向上させている。物流分野では、倉庫の自動化、マテリアルハンドリング、オーダーフルフィルメントで協働ロボットの恩恵を受け、サプライチェーンを合理化している。

協働ロボットが AI と機械学習によって進化し続けることで、業界全体で協働ロボットの採用が進み、イノベーションとオペレーショナル・エクセレンスがさらに推進されるだろう。

## 付録 C. データスペース戦略議論と企業の準備状況

2024 年度に東京で開催された RRI シンポジウムでは、企業のレディネスとデータスペース戦略のバランスについて議論した[165][166]。その際、データスペースの特性とデータスペースを活用する企業の状況について、図 67 で示す 4 象限図を用いて議論を整理した。

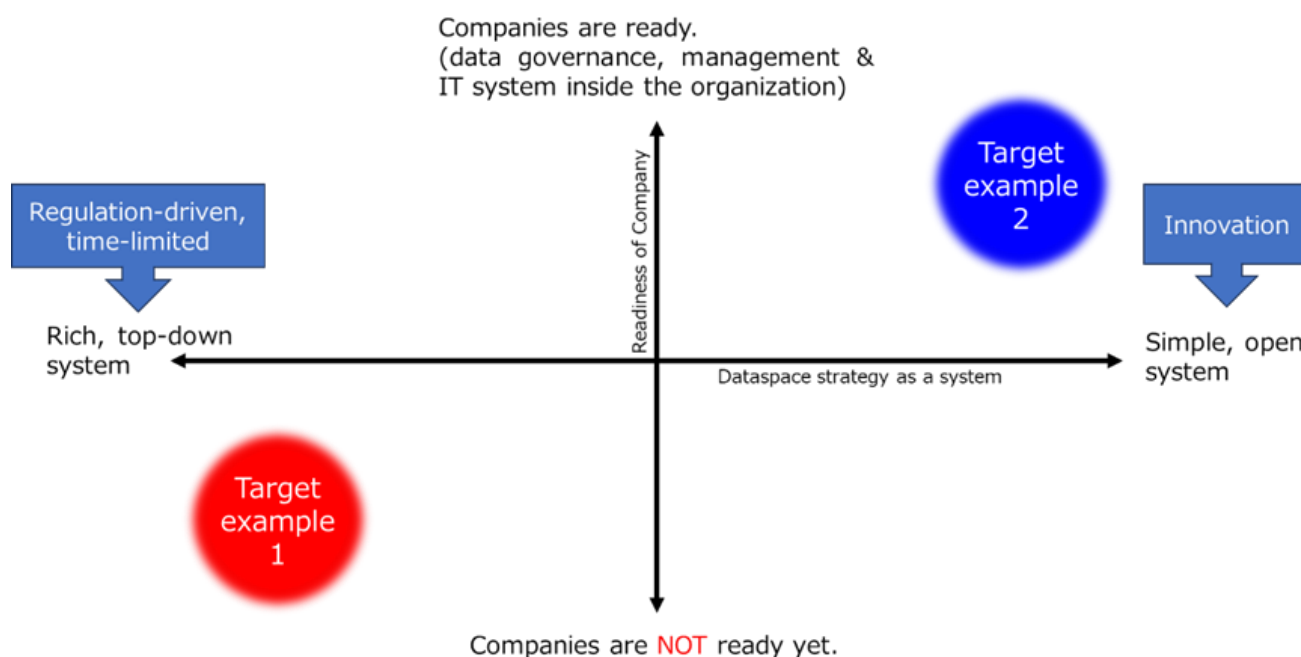


図 67 - データスペース戦略議論と企業の準備状況の関係[165][166]

図 67 において、RRI は 2 つのターゲットを検討している。ターゲット 1 は、企業は準備ができていないが、規制要件が差し迫っているため、データを活用しなければならない状況を示している。この場合、データスペースシステムは、これらの企業をサポートするためにより多くの機能を持つ必要がある。ターゲット 2 は、企業の準備が整っており、データスペースが参加者から多くのイノベーションを引き出すのに十分なほどシンプルでオープンである状況を示している。これはデータスペースの例であるが、先端技術を活用する企業の状況は、TRL (Technology Readiness Level) や BRL (Business Readiness Level) といった成熟度で整理されて議論されることから、HMI も同様のアナロジーで整理することが必要である。

## 参考文献

- [1] “What is Industrie 4.0?”, The Plattform Industrie 4.0、  
<https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Standardartikel/what-is-industrie40.html?nn=1093172>
- [2] "Revitalizing Human-Machine Interaction for the Advancement of Society - Perspectives from Germany and Japan", Henning Kagermann, Youichi Nonaka et al. (eds.), acatech DISCUSSION, 09 September 2019、  
<https://en.acatech.de/publication/revitalizing-human-machine-interaction-for-the-advancement-of-society-perspectives-from-germany-and-japan/>
- [3] History of the platform, The background to Plattform Industrie 4.0、  
<https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/ThePlatform/Background/background.html>
- [4] World leaders adopt Sustainable Development Goals, United Nations Development Programme, September 25, 2015、  
<https://web.archive.org/web/20190122182231/http://www.undp.org/content/undp/en/home/presscenter/pressreleases/2015/09/24/undp-welcomes-adoption-of-sustainable-development-goals-by-world-leaders.html>
- [5] 労働生産性の国際比較 2023, 日本生産性本部、  
<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/summary2023.pdf>
- [6] Investing in productivity growth, McKinsey Global Institute, March 2024、  
<https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/investing-in-productivity-growth>
- [7] "What is Davos?", McKinsey Explainers, January 2024、  
<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/mckinsey%20explainers/what%20is%20davos/what-is-davos-2023final.pdf?shouldIndex=false>
- [8] IMF Annual Report 2024, 24 September 2024、  
<https://cdn.sanity.io/files/yg4ck731/production/305c76ee35a5e231ed9b2720ff64d8f980a4101e.pdf/English%202024%20IMF%20Annual%20Report.pdf>
- [9] 科学技術・イノベーション、内閣府  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain.html>
- [10] Society 5.0 とは、内閣府  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)
- [11] Overview of Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP)、内閣府  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/english/sipoverview.pdf>
- [12] Overview of the 14 Projects of Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP)、内閣府  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/english/sip14pro\\_overview.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/english/sip14pro_overview.pdf)
- [13] ムーンショット型研究開発制度、内閣府  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>
- [14] 研究開発と Society 5.0 との橋渡しプログラム (BRIDGE) 、内閣府  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/bridge/index.html>

- [15] Outline of the Sixth Basic Environment Plan、環境省  
[https://www.env.go.jp/council/content/i\\_01/000281035.pdf](https://www.env.go.jp/council/content/i_01/000281035.pdf)
- [16] Strategic Energy Plan、経済産業省  
[https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic\\_plan/](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/)
- [17] Outlines of Japan's Long-term Strategy under the Paris Agreement、環境省  
<https://www.env.go.jp/content/900451304.pdf>
- [18] Japan's energy policy toward achieving GX (Part 2), Policy package toward simultaneously realizing decarbonization and economic growth、経済産業省  
[https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail\\_179.html](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_179.html)
- [19] 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業、科学技術振興機構(JST)  
<https://www.jst.go.jp/lcs/en/index.html>
- [20] GteX（革新的 GX 技術創出事業）とは、科学技術振興機構  
<https://www.jst.go.jp/gtex/overview/index.html>
- [21] 先端的低炭素化技術開発：ALCA、JST  
<https://www.jst.go.jp/alca/archive/en/index.html>
- [22] Research, Development and Demonstration of CCUS Technology、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）  
[https://www.nedo.go.jp/english/activities/activities\\_ZZJP\\_100141.html](https://www.nedo.go.jp/english/activities/activities_ZZJP_100141.html)
- [23] 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、  
[https://www.meti.go.jp/english/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs2050/index.html](https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/ggs2050/index.html)
- [24] Green x Digital Consortium、経済産業省  
[https://gx-league.go.jp/aboutgxleague/document/GX\\_League\\_Overview.pdf](https://gx-league.go.jp/aboutgxleague/document/GX_League_Overview.pdf)
- [25] グリーン×デジタルコンソーシアム、JEITA、  
<https://www.gxdc.jp/english/>
- [26] Here's more about the 6th Strategic Energy Plan, Renewable energy expanding with cost reduction while promoting acceptance of local communities、経済産業省  
[https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail\\_173.html](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_173.html)
- [27] The 5<sup>th</sup> Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society、環境省  
<https://www.env.go.jp/content/000264244.pdf>
- [28] About Circular Partners、環境省  
<https://www.cps.go.jp/webruntime/org-asset/c1d2d24970/resource/081GA000001iEGV>
- [29] Development of Circular Economy System、内閣府  
[https://www.erca.go.jp/sip/english/development\\_3rd.html](https://www.erca.go.jp/sip/english/development_3rd.html)
- [30] Creating a Materials Innovation Ecosystem for Industrialization、14 ページ [12]
- [31] Expansion of Fundamental Technologies and Development of Rules Promoting Social Implementation to Expand HCPS Human-Collaborative Robotics、11 ページ [12]
- [32] グリーン産業都市の構築、次世代未来都市共創プロジェクト、日立市×HITACHI  
<https://www.city.hitachi.lg.jp/kyoso-project/themes/1014818/index.html>

- [33] Towards Green Transformation to Achieve Hitachi Zero-Carbon City Vision for 2050, Yukiko YOSHIDA, Yujiro HIRANO, Energy Proceedings, Vol 55, 2025, ISSN 2004-2965  
<https://www.energy-proceedings.org/wp-content/uploads/icae2024/1728540992.pdf>
- [34] EPA – Greenhouse Gas Emissions by Industry, U.S. Environmental Protection Agency  
<https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
- [35] EIA – U.S. Industrial Energy Consumption Statistics, U.S. Energy Information Administration  
<https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php>
- [36] EPA – Plastics and Municipal Solid Waste, U.S. Environmental Protection Agency  
<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>
- [37] NREL – Plastic Waste Estimates in the U.S., National Renewable Energy Laboratory  
<https://www.nrel.gov/news/press/2022/nrel-calculates-lost-value-of-landfilled-plastic-in-us.html>
- [38] Grand View Research – U.S. Green Technology and Sustainability Market Outlook  
<https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/green-technology-sustainability-market/united-states>
- [39] Federal Sustainability Plan, Catalyzing America's Clean Energy Industries and Jobs, December 2021, THE WHITE HOUSE.  
<https://www.sustainability.gov/pdfs/federal-sustainability-plan.pdf>
- [40] How the Inflation Reduction Act Will Affect U.S. Emissions, Martin Armstrong, August 9, 2022, statista  
<https://www.statista.com/chart/27935/how-the-inflation-reduction-act-will-affect-us-ghg-emissions/>
- [41] BGOV OnPoint: CHIPS Act Opportunities for Federal Contractors, October 6, 2022,  
<https://news.bloomberglaw.com/federal-contracting/bgov-onpoint-chips-act-opportunities-for-federal-contractors>
- [42] 2030 Vision for Industrie 4.0, Shaping Digital Ecosystems Globally, June 14, 2019, Plattform Industrie 4.0  
[https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Infographics/vision2030.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Infographics/vision2030.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [43] Themenfelder Industrie 4.0 (2. überarbeitete Fassung)  
<https://www.acatech.de/publikation/themenfelder-i40-akt/>
- [44] Künstliche Intelligenz zur Umsetzung von Industrie 4.0 im Mittelstand  
<https://www.acatech.de/publikation/fb4-0-ki-in-kmu/>
- [45] Schneller zum Markterfolg. Memorandum des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 für ein agileres und flexibleres Innovationssystem in Deutschland  
<https://www.acatech.de/publikation/memorandum-des-forschungsbeirats/>
- [46] Die digitale Transformation gestalten: Lebenslanges Lernen fördern. Empfehlungen des Human-Resources-Kreises von acatech und der Jacobs Foundation sowie der Hans-Böckler-Stiftung

- <https://www.acatech.de/publikation/die-digitale-transformation-gestalten-lebenslanges-lernen-foerdern/>
- [47] Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme  
<https://www.acatech.de/publikation/engineering-autonom-wandelbar/>
- [48] Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen  
<https://www.acatech.de/publikation/umsetzung-von-cyber-physischen-matrixproduktionssystemen/>
- [49] Aufbau, Nutzung und Monetarisierung einer industriellen Datenbasis  
<https://www.acatech.de/publikation/industrielle-datenbasis/>
- [50] Was ist die Plattform Industrie 4.0?  
<https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Home/home.html>
- [51] Wie verändern neue Technologien die Arbeit in Produktionsbetrieben?  
<https://www.acatech.de/publikation/kurzformat-arbeit-und-produktion/>
- [52] Künstliche Intelligenz und industrielle Arbeit - Perspektiven und Gestaltungsoptionen,  
<https://www.acatech.de/publikation/ki-industrielle-arbeit/>
- [53] Akzeptanz von Industrie 4.0. Abschlussbericht zu einer explorativen empirischen Studie über die deutsche Industrie  
<https://www.acatech.de/publikation/abschlussbericht-akzeptanz-in-der-industrie-4-0/>
- [54] Akzeptanz von Industrie 4.0  
<https://www.acatech.de/publikation/akzeptanz-und-attraktivitaet-in-der-industriearbeit-4-0/>
- [55] EU-Japan Digital Partnership Webinar - Connecting the EU, Japan and the World -, Manufacturing Data Space activity in Japan, Kazuo Nakashima, 2024.3.12, RRI (Robot Revolution & Industrial IoT Initiative)  
<https://cdnw8.eu-japan.eu/sites/default/files/imce/2024.3.12%20RRI.pdf>
- [56] The eleven use cases of Factory-X, based on a common kernel and basic services, Factory-X – a sovereign data room for mechanical and industrial engineering, An open data ecosystem for factory equipment suppliers and their customers - on the foundations of Industrie 4.0 and Gaia-X/Catena-X, Dr.-Ing. Olaf Sauer, Deputy Head of Institute, Business Unit Automation and Digitalization, 2025  
<https://www.iosb.fraunhofer.de/en/projects-and-products/factory-x.html>
- [57] Foundational Framework for IMX  
<https://imxc.org/>
- [58] Status of International Manufacturing-X as of June 2025, Manufacturing-X initiative  
<https://imxc.org/>
- [59] 中小企業・小規模事業者の共通基盤、第3章 2023年版日本版中小企業白書、経済産業省中小企業庁、2024年7月18日  
[https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2023/PDF/chusho/04Hakusyo\\_part2\\_chap3\\_web.pdf](https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2023/PDF/chusho/04Hakusyo_part2_chap3_web.pdf)
- [60] “Gеоeconomic Fragmentation and the Future of Multilateralism”, IMF Staff Discussion Note, 15 January 2023

- <https://www.imf.org/en/Publications/Staff-Discussion-Notes/Issues/2023/01/11/Geo-Economic-Fragmentation-and-the-Future-of-Multilateralism-527266>
- [61] 「19-14 産業別常用労働者 1 人平均月間現金給与額」、総務省統計局  
<https://www.stat.go.jp/data/nihon/19.html>
- [62] 令和 6 年度 ものづくり基盤技術の振興施策、経済産業省  
<https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2025/pdf/all.pdf>
- [63] Manufacturing Sector: Output per Worker for All Workers, FRED, December 10, 2024  
<https://fred.stlouisfed.org/series/PRS30006163>
- [64] Federal Reserve Bank of New York, The Mysterious Slowdown in U.S. Manufacturing Productivity  
<https://libertystreeteconomics.newyorkfed.org/2024/07/the-mysterious-slowdown-in-u-s-manufacturing-productivity/>
- [65] U.S. Bureau of Labor Statistics, Total Factor Productivity News Release  
<https://www.bls.gov/news.release/prod3.htm>
- [66] US Manufacturing Could Need as Many as 3.8 Million New Employees by 2033, According to Deloitte and The Manufacturing Institute  
<https://www2.deloitte.com/us/en/pages/about-deloitte/articles/press-releases/us-manufacturing-could-need-new-employees-by-2033.html>
- [67] Highest and Lowest Productivity Levels in OECD-countries in 2022, April 2022, QERY  
<https://qery.no/highest-and-lowest-productivity-levels-in-oecd-countries-in-2022/>
- [68] Highest and Lowest Productivity Levels in OECD-countries in 2022  
<https://qery.no/highest-and-lowest-productivity-levels-in-oecd-countries-in-2022/>
- [69] Labour productivity - slower growth in Germany and Europe, Peter Kuntze, Christoph-Martin Ma, Federal Statistical Office of Germany, April 15, 2020  
[https://www.destatis.de/EN/Methods/WISTAScientificJournal/Downloads/labour-productivity-022020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.destatis.de/EN/Methods/WISTAScientificJournal/Downloads/labour-productivity-022020.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [70] Productivity of the German economy stagnates, Matthias Janson, Economy, Statista, 22.05.2025  
<https://de.statista.com/infografik/33692/reales-bip-je-erwerbstaetigem-und-je-erwerbstaetigenstunde-in-deutschland/>
- [71] Industrie 4.0-Forschung für die Gestaltung der Zukunft (Impulsbericht), Plattform Industrie 4.0 / acatech, 16. November 2021  
<https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-forschung-fuer-die-gestaltung-der-zukunft/>
- [72] Digitalisierung von Arbeit: Folgen, Grenzen und Perspektiven, Soziologisches Arbeitspapier Nr. 43/2015, Prof. Dr. H. Hirsch-Kreinsen, Prof. Dr. J. Weyer, Prof. Dr. M. Wilkesmann, technische universität dortmund  
<https://d-nb.info/111246820X/34>
- [73] Industrie 4.0 im Mittelstand: Erfolgsfaktoren in der Organisation, Forschungsbeirat Industrie 4.0 /acatech, 12. November 2024  
<https://www.acatech.de/publikation/kurzformat-erfolg-im-mittelstand/>

- [74] Neue Studie: Industrie 4.0 steigert Produktivität deutlich, Carsten Knop, Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH, 17.02.2016  
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/industrie-4-0-steigert-produktivitaet-in-deutschland-deutlich-14071866.html>
- [75] We'd Better Watch Out, Robert M. Solow, New York Times Book Review, July 12, 1987  
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599544098816>
- [76] The Future of Jobs Report 2025, January 2025, World Economic Forum  
<https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/>
- [77] AI とデジタル化が労働市場を再編：世界経済フォーラム「Future of Jobs Report 2025」が示す未来、vonxai inc.  
<https://blog.vonxai.co.jp/post/future-of-jobs-report-2025-ai-digitalization-impact-japan/>
- [78] 労働市場の将来推計→→2035、パーソル総合研究所、2024年10月17日  
<https://rc.persol-group.co.jp/thinktank/spe/roudou2035/>
- [79] 未来人材ビジョン、経済産業省、2022年5月  
<https://www.meti.go.jp/press/2022/05/20220531001/20220531001-1.pdf>
- [80] イノベーションによって変化する世界の貿易構造と経済成長の道筋、第2章、第II部、令和4年版 通商白書、経済産業省  
<https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2022/2022honbun/i2210000.html>
- [81] スポット・ワークが促す将来の働き方変化と企業の人材獲得におけるポイント、KPMG コンサルティング、2024年6月26日  
<https://kpmg.com/jp/ja/home/insights/2024/06/spotwork-talent-acquisition.html>
- [82] BLS Report, Industry and occupational employment projections overview and highlights, 2023–33, Nov 2024  
<https://www.bls.gov/opub/mlr/2024/article/industry-and-occupational-employment-projections-overview-and-highlights-2023-33.htm>
- [83] Deloitte, Taking charge: Manufacturers support growth with active workforce strategies  
<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/supporting-us-manufacturing-growth-amid-workforce-challenges.html>
- [84] US Department of Energy, United States Energy & Employment Report 2024  
[https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-10/2024%20USEER%20EXEC%201002\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-10/2024%20USEER%20EXEC%201002_0.pdf)
- [85] BLS, Industry and occupational employment projections overview and highlights, 2023–33, Nov. 2024  
<https://www.bls.gov/opub/mlr/2024/article/industry-and-occupational-employment-projections-overview-and-highlights-2023-33.htm>
- [86] BLS, Incorporating AI impacts in BLS employment projections: occupational case studies  
<https://www.bls.gov/opub/mlr/2025/article/incorporating-ai-impacts-in-bls-employment-projections.htm>
- [87] Revitalizing America’s Manufacturing Workforce, A マニュファクチャリング USA National Roadmap, NOVEMBER 2023, Manufacturing USA

- [https://www.ManufacturingUSA.com/sites/ManufacturingUSA.com/files/2024-09/MFG%20USA%20EWD%20Roadmap%202023\\_0.pdf](https://www.ManufacturingUSA.com/sites/ManufacturingUSA.com/files/2024-09/MFG%20USA%20EWD%20Roadmap%202023_0.pdf)
- [88] QAD - The Manufacturing Skills Gap and the Gig Economy  
<https://www.qad.com/documents/3488095//3499672//manufacturing-skills-gap-and-gig-economy.pdf>
- [89] ADP Research, Insights Into the Gig Workforce in Businesses  
<https://www.adp.com/-/media/adp/resourcehub/pdf/adpri/illuminating-the-shadow-workforce-by-adp-research-institute.ashx>
- [90] MBO\_2023\_State\_of\_Independence\_Research\_Report.pdf  
[https://info.mbopartners.com/rs/mbo/images/MBO\\_2023\\_State\\_of\\_Independence\\_Research\\_Report.pdf](https://info.mbopartners.com/rs/mbo/images/MBO_2023_State_of_Independence_Research_Report.pdf)
- [91] Strengthening U.S. Manufacturing: Manufacturing USA® and the Manufacturing Extension Partnership, March 16, 2024, NIST  
[https://www.nist.gov/system/files/documents/2024/03/16/MEP\\_MFGUSA\\_508\\_v1\\_20%20%5B12%5D.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/2024/03/16/MEP_MFGUSA_508_v1_20%20%5B12%5D.pdf)
- [92] What is platform work?, EU rules on platform work, European Council, Council of the European Union  
<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/platform-work-eu/>
- [93] Skills in transition: the way to 2035, European Centre for the Development of Vocational Training, September 2023, DOI: 10.2801/438491TI-07-23-287-EN-NISBN: 978-92-896-3621-614/09/2023  
[https://www.cedefop.europa.eu/files/4213\\_en.pdf](https://www.cedefop.europa.eu/files/4213_en.pdf)
- [94] Digital platform workers: EU rules one step closer, European Parliament, 2023  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/749794/EPRS\\_ATA\(2023\)749794\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/749794/EPRS_ATA(2023)749794_EN.pdf)
- [95] Platform Work: first green light to new EU rules on employment status, 19-03-2024, European Parliament  
<https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240318IPR19420/platform-work-first-green-light-to-new-eu-rules-on-employment-status>
- [96] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, The Union of Skills, European Commission, 5.3.2025  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52025DC0090>
- [97] 欧州委員会から欧州議会、欧州理事会、欧州経済社会委員会および欧州地域委員会への通達、EUの競争力コンパス、欧州委員会、2025年1月29日  
[https://european-research-area.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/2025-01/COM%202025%2030%20-%20A%20Competitiveness%20Compass%20for%20the%20EU%20\\_%2029-1-2025.pdf](https://european-research-area.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/2025-01/COM%202025%2030%20-%20A%20Competitiveness%20Compass%20for%20the%20EU%20_%2029-1-2025.pdf)
- [98] The future of European competitiveness, Part A: A competitiveness strategy for Europe, SEPTEMBER 2024, Mario Draghi, European Commission

- [https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961\\_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness%20\\_%20A%20competitiveness%20strategy%20for%20Europe.pdf](https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness%20_%20A%20competitiveness%20strategy%20for%20Europe.pdf)
- [99] Much more than a market – Speed, Security, Solidarity, Empowering the Single Market to deliver a sustainable future and prosperity for all EU Citizens, Enrico Letta, April 2024, Council of the European Union  
<https://www.consilium.europa.eu/media/ny3j24sm/much-more-than-a-market-report-by-enrico-letta.pdf>
- [100] Safer Together – Strengthening Europe’s Civilian and Military Preparedness and Readiness, Sauli Niinistö, November 2024, European Commission  
[https://commission.europa.eu/document/download/5bb2881f-9e29-42f2-8b77-8739b19d047c\\_en?filename=2024\\_Niinisto-report\\_Book\\_VF.pdf](https://commission.europa.eu/document/download/5bb2881f-9e29-42f2-8b77-8739b19d047c_en?filename=2024_Niinisto-report_Book_VF.pdf)
- [101] Understanding Trade-offs and synergies SDGs 1,2, 8, 17 and others, Maximo Torero, Chief Economist, Food and Agriculture Organization of the United Nations  
<https://sdgs.un.org/sites/default/files/2021-06/Understanding%20Trade-offs%20and%20Synergies%20-%20SDGs%201%2C%202%2C%208%2C%2017%20and%20others%20-%20Maximo%20Torero.pdf>
- [102] Union of skills, European Commission  
[https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/union-skills\\_en](https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/union-skills_en)
- [103] 第4節 国際的なエネルギーコストの比較、エネルギー白書2024、資源エネルギー庁、経済産業省  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/html/2-2-4.html>
- [104] 第203回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説、首相官邸  
[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/actions/202010/26shu\\_san\\_honkaigi.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/actions/202010/26shu_san_honkaigi.html)
- [105] 温室効果ガスの削減目標及び緊急事態宣言等についての会見、首相官邸  
[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/actions/202104/22bura.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/actions/202104/22bura.html)
- [106] 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、内閣官房、経済産業省、内閣府、金融庁、総務省、外務省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、環境省、2021年6月18日  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/pdf/green\\_honbun.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf)
- [107] グリーンイノベーション基金、経済産業省  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/gifund/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html)
- [108] グリーンイノベーション基金とは、NEDO  
<https://green-innovation.nedo.go.jp/article/to-business/>
- [109] Efforts to Realize Sustainable Socioeconomic Systems、2023年版日本の環境年報、環境省  
<https://www.env.go.jp/content/000175160.pdf>
- [110] 家電リサイクル法の概要、環境省  
<https://www.env.go.jp/recycle/kaden/gaiyo.html>
- [111] Towards Osaka Blue Ocean Vision - G20 Implementation Framework for Actions on Marine Plastic Litter  
<https://g20mpl.org/>

- [112] Ghosh, Shampa; Sinha, Jitendra Kumar; Ghosh, Soumya; Vashisth, Kshitij; Han, Sungsoo; Bhaskar, Rakesh (January 2023). "Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health". *Sustainability*. 15 (14): 10821. doi:10.3390/su151410821. ISSN 2071-1050  
<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/10821>
- [113] Beverley Henry, Kirsi Laitala, Ingun Grimstad Klepp, Microfibres from apparel and home textiles: Prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment, *Science of The Total Environment*, Volume 652,2019, Pages 483-494, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.166>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971834049X>
- [114] Matthew Cole, Pennie Lindeque, Claudia Halsband, Tamara S. Galloway, Microplastics as contaminants in the marine environment : A review, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 62, Issue 12, 2011, Pages 2588-2597, ISSN 0025-326X  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- [115] Zhang, H. (2017). "Transport of microplastics in coastal seas." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199, 74-86. DOI: 10.1016/j.ecss.2017.09.032  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272771417307254>
- [116] 半導体拠点整備費を配分 北海道や熊本など計 60 億円、日本経済新聞, 2024 年 01 月 31 日  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA31BX10R30C24A1000000/?msockid=11d48cf7fc606c6e058798effdeb6dd0>
- [117] 出典 高本仁志、産業技術総合研究所、2025 年 6 月
- [118] 地域課題分析レポート (2024 年夏号)、半導体投資が地域経済に与える影響、内閣府政策統括官 (経済財政分析)、  
<https://www5.cao.go.jp/j-j/cr/cr24-2/cr24-2.html>
- [119] Expert Group on the Development of Digital Infrastructures (DCs, etc.): Interim Report 3.0 (Summary)、経済産業省  
[https://www.meti.go.jp/english/press/2024/pdf/1004\\_001a.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2024/pdf/1004_001a.pdf)
- [120] U.S. primary energy production, consumption, and exports increased in 2024, *Today in Energy*, June 20, 2025, U.S. Energy Information Administration  
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65524&utm>
- [121] US Electricity 2025 Special Report, EMBER, 12 March 2025  
<https://ember-energy.org/app/uploads/2025/03/US-Electricity-2025-Special-Report.pdf>
- [122] DOE Releases New Report Evaluating Increase in Electricity Demand from Data Centers, December 20, 2024  
<https://www.energy.gov/articles/doe-releases-new-report-evaluating-increase-electricity-demand-data-centers>
- [123] Electricity use for commercial computing could surpass space cooling, ventilation, In-brief analysis, June 25, 2025, U.S. Energy Information Administration  
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65564>
- [124] Annual Energy Outlook 2025, April 15, 2025  
<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>

- [125] Data Center Infrastructure in the United States  
<https://docs.nrel.gov/docs/gen/fy25/94502.jpg>
- [126] Gridlock: the demand dilemma facing the US power industry, HORIZONS, Wood Mackenzie, October 2024  
<https://www.woodmac.com/horizons/gridlock-demand-dilemma-facing-us-power-industry/>
- [127] Eighteen New Semiconductor Fabs to Start Construction in 2025, SEMI Reports, SEMI, January 7, 2025  
<https://www.semi.org/en/semi-press-release/eighteen-new-semiconductor-fabs-to-start-construction-in-2025-semi-reports/>
- [128] 2024 Long-Term Reliability Assessment, North American Electric Reliability Corporation (NERC), July 15, 2025  
[https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/NERC\\_Long%20Term%20Reliability%20Assessment\\_2024.pdf](https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/NERC_Long%20Term%20Reliability%20Assessment_2024.pdf)
- [129] What are microplastics? NOAA, June 2024  
<https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>
- [130] EPA, Plastics: Material Specific Data  
<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>
- [131] Woodall, L.C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., et al., "The deep sea is a major sink for microplastic debris.", Royal Society Open Science, 1(4), 140317.DOI: 10.1098  
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.140317>
- [132] USGS, Microplastics in our Nation's waterways  
<https://labs.waterdata.usgs.gov/visualizations/microplastics/index.html>
- [133] National Strategy to Prevent Plastic Pollution, November 2024  
<https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/11-21-2024-final-nsppp-announcement-presentation-508adc.pdf>
- [134] EPA: Executive Summary of the National Strategy to Prevent Plastic Pollution  
<https://www.epa.gov/circulareconomy/executive-summary-national-strategy-prevent-plastic-pollution>
- [135] NIST, Circular Economy to Reduce Plastic Waste  
<https://www.nist.gov/news-events/news/2024/03/nist-awards-nearly-3-million-educational-programs-focused-circular-economy>
- [136] U.S. Department of Energy Invests \$13.4 Million to Combat Plastic Waste, Reduce Plastic Industry Emissions  
<https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-invests-134-million-combat-plastic-waste-reduce-plastic-industry>
- [137] BOTTLE: Bio-Optimized Technologies to Keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment, DOE, the U.S.  
<https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bottle-bio-optimized-technologies-keep-thermoplastics-out-landfills-and-environment>

- [138] 人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備、社会実装に向けた戦略・研究開発計画、戦略的イノベーション創造推進プログラム（SIP）、科学技術・イノベーション会議事務局、内閣府、2023年6月  
<https://www.nedo.go.jp/content/100963291.pdf>
- [139] The European Green Deal - Striving to be the first climate-neutral continent, European Commission  
[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [140] REPowerEU, Affordable, secure and sustainable energy for Europe, European Commission  
[https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu\\_en](https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en)
- [141] The Green Deal Industrial Plan - Putting Europe's net-zero industry in the lead, European Commission  
[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en)
- [142] EU action to address the energy crisis, European Commission  
[https://commission.europa.eu/topics/energy/eu-action-address-energy-crisis\\_en](https://commission.europa.eu/topics/energy/eu-action-address-energy-crisis_en)
- [143] A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society, Informs the forthcoming Scientific Opinion of the European Commission Group of Chief Scientific Advisors, ISBN 978-3-9820301-0-4 DOI 10.26356/microplastics, SAPEA, Science Advice for Policy by European Academies. (2019). A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society. Berlin: SAPEA. <https://doi.org/10.26356/microplastics>, 15 January 2019  
<https://scientificadvice.eu/advice/a-scientific-perspective-on-microplastics-in-nature-and-society/>
- [144] A scientific perspective on microplastics in nature and society, 15 January 2019, SCIENCE ADVICE FOR POLICY BY EUROPEAN ACADEMIES.  
<https://www.euro-case.org/wp-content/uploads/2019/07/Eurocase/SAPEA/pdf-report/sapea-report04.pdf>
- [145] Commission Regulation (EU) 2023/2055 - Restriction of microplastics intentionally added to products, Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, European Commission  
[https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/chemicals/reach/restrictions/commission-regulation-eu-20232055-restriction-microplastics-intentionally-added-products\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/chemicals/reach/restrictions/commission-regulation-eu-20232055-restriction-microplastics-intentionally-added-products_en)
- [146] Plastic pellet losses: Council and Parliament agree on new rules to reduce microplastic pollution, Press office - General Secretariat of the Council of the EU, April 8, 2025  
<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/04/08/plastic-pellet-losses-council-and-parliament-agree-on-new-rules-to-reduce-microplastic-pollution/pdf/>
- [147] 出典 野中洋一、日立製作所、2025年6月
- [148] AI for Resilient Manufacturing Institute Competition Notice of Funding Opportunity、Manufacturing USA、2024年7月22日  
<https://www.ManufacturingUSA.com/news/ai-resilient-manufacturing-institute-competition-notice-funding-opportunity>

- [149] 人工知能が奪う職業と「洗練された奴隷制」、小林正啓、RAD-IT21 WEB マガジン  
<https://rad-it21.com/ai/mkobayashi20180717/>
- [150] 人口減少時代の ICT による持続的成長、2018 年版 日本版情報通信白書、総務省  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/pdf/30honpen.pdf>
- [151] McKinsey Global Institute, "Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation", December 2017  
<https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/What%20the%20future%20of%20work%20will%20mean%20for%20jobs%20skills%20and%20wages/MGI-Jobs-Lost-Jobs-Gained-Executive-summary-December-6-2017.pdf>
- [152] Why Is Labor Receiving a Smaller Share of Global Income?, Theory and Empirical Evidence, Mai Chi Dao, Mitali Das, Zsoka Koczan, Weicheng Lian, WP/17/169, IMF Working Paper, July 2017  
<https://www.imf.org/~media/Files/Publications/WP/2017/wp17169.ashx>
- [153] Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation, David H. Autor, Journal of Economic Perspectives, Volume 29, Number 3, Summer 2015, Pages 3–30  
[https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/109476/Autor\\_Why%20are%20there.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/109476/Autor_Why%20are%20there.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [154] A Federated Learning-Based Intrusion Detection System for Industrial IoT. IEEE Internet of Things Journal, 2024  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10602094>
- [155] Brynjolfsson, E., & Mitchell, T. What can machine learning do? Workforce implications. Science, 358(6370), 1530–1534, 2017  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap8062>
- [156] Agrawal, A., Gans, J., & Goldfarb, A. The business of artificial intelligence: What it can – and cannot – do for your organization. Business Horizons, 61(4), 469–478, 2018  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681318300387>
- [157] Caruso, L. Digital innovation and the fourth industrial revolution: Epochal social changes? AI & Society, 33, 379–392, 2018  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00146-017-0736-1>
- [158] Smith, A., & Anderson, J. AI, Robotics, and the Future of Jobs. Pew Research Centre, 2014  
<https://www.fusbp.com/wp-content/uploads/2010/07/AI-and-Robotics-Impact-on-Future-Pew-Survey.pdf>
- [159] 出典 高橋清隆、日立製作所、2025 年 6 月
- [160] Generative AI and the future of work in America, McKinsey Global Institute, July 2023  
<https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/generative-ai-and-the-future-of-work-in-america>
- [161] Generative AI, the American Worker, and the Future of Work, 2024, The Brookings Institution, August 2024

- <https://www.brookings.edu/articles/generative-ai-the-american-worker-and-the-future-of-work/>
- [162] Transparency, integrity and accountability in the EU institutions, BRIEFING For the PETI committee, European Parliament  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/608873/IPOL\\_BRI\(2019\)608873\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/608873/IPOL_BRI(2019)608873_EN.pdf)
- [163] Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile, NIST Trustworthy and Responsible AI, NIST AI 600-1  
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.600-1.pdf>
- [164] The Industrial Data Ecosystem Manufacturing-X, Make Data Work. Competitive, Resilient & Sustainable, Manufacturing-X-Talk, February 5, 2025  
[https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/MX-Talk16.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/MX-Talk16.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [165] The relationship between dataspace and companies' readiness levels, Shinsuke Kondo, Ingo Sawilla, Kazuo Nakashima, S3-4 Manufacturing Data Space as Booster to be a data-driven Society, RRI International Symposium 2024  
[https://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Symposium/2024/S3-4\\_Manufacturing\\_Data\\_Space.pdf](https://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Symposium/2024/S3-4_Manufacturing_Data_Space.pdf)
- [166] S3-4 Manufacturing Data Space as Booster to be a data-driven Society, RRI International Symposium 2024, Prof. Dr. Shinsuke Kondo, Mr. Ingo Sawilla and Mr. Kazuo Nakashima  
[https://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Symposium/2024/S3-4\\_Manufacturing\\_Data\\_Space.pdf](https://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Symposium/2024/S3-4_Manufacturing_Data_Space.pdf)



ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会  
Robot Revolution & Industrial IoT Initiative

