

# 将来のサーキュラーエコノミー社会のための フォーサイト

～日本－フィンランド共同プロジェクト～

2020 年 11 月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所

科学技術予測センター

浦島邦子 黒木優太郎

【調査研究体制】

浦島邦子	科学技術予測センター	上席研究官
黒木優太郎	科学技術予測センター	研究官

【Authors】

URASHIMA Kuniko	Senior Research Fellow, Science and Technology Foresight Center, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT
KUROGI Yutaro	Research Fellow, Science and Technology Foresight Center, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

本報告書の引用を行う際には、以下を参考に出典を明記願います。

Please specify reference as the following example when citing this NISTEP RESEARCH MATERIAL.

浦島邦子，黒木優太郎，「将来のサーキュラーエコノミー社会のためのフォーサイト ～日本－フィンランド共同プロジェクト～」，*NISTEP RESEARCH MATERIAL*, No.300, 文部科学省科学技術・学術政策研究所.

DOI: <http://doi.org/10.15108/rm300>

URASHIMA Kuniko, KUROGI Yutaro, “Foresight for our circular economy society –cooperative project between Business Finland and NISTEP–,” *NISTEP RESEARCH MATERIAL*, No.300, National Institute of Science and Technology Policy, Tokyo.

DOI: <http://doi.org/10.15108/rm300>

## 将来のサーキュラーエコノミー社会のためのフォーサイト 日本ーフィンランド共同プロジェクト

文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測センター

浦島邦子 黒木優太郎

### 要旨

現在、フィンランドでは「サーキュラーエコノミー」を科学技術政策の中心として位置づけ、様々な施策を実施している。ビジネス・フィンランドと NISTEP は長年共同プロジェクトを実施し、フォーサイトを通じて科学技術に関する両国の違い等を調査してきた。本報告では、2019 年より開始した、サーキュラーエコノミーに焦点を当てた共同プロジェクトの結果を報告する。

本プロジェクトの目的は、日本とフィンランドの将来のイノベーションに資する科学技術を特定することである。両国で自国の研究者を対象にデルファイ調査を実施し、サーキュラーエコノミーに関連する科学技術トピックの重要度・国際競争力・科学技術的实现時期・社会的实现時期の、日本とフィンランドの間の違いを比較した。その結果、重要度と国際競争力の関係は、日本は重要度と国際競争力は正の相関関係となったが、フィンランドは正反対(負の相関)の結果となった。また、ICT や材料科学関連の科学技術を除き、全体的にフィンランドの方が科学技術的实现、社会的实现共に早期に実現すると予想された。フィンランドにおいて追加の専門家ヒアリングを実施した結果を踏まえ、今後両国のイノベーションに資する可能性がある科学技術として、主に環境問題、バイオエコノミーに関する科学技術が挙げられた。また、食物等の関連トピックについても、COVID-19 の世界的流行を受けて今後さらに加速する可能性がある。

### Title

Foresight for our circular economy society

- Cooperative project between Business Finland and NISTEP -

S&T Foresight Center, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

### ABSTRACT

Currently, in Finland, the "circular economy" is positioned as the center of science and technology policy, and various measures are being implemented. Business Finland and NISTEP have a long history of conducting joint projects and studying the differences between the two countries. In September 2019, we started a joint project focusing on the circular economy.

The purpose of this project is to identify the areas that contribute to future innovation between Japan and Finland by setting the same questions and conducting questionnaires and comparing the results. Specifically, the differences between Japan and Finland in emerging technologies related to the circular economy were clarified by comparison of Delphi surveys conducted in both countries for their own researchers. Regarding the relationship between the importance of technology and the international competitiveness with a view to the future, Japan had a positive correlation with international competitiveness with respect to importance, but Finland had the opposite result (negative correlation). In addition, except for ICT/materials-related technologies, Finland is generally expected to be realized sooner.

## 概要

ビジネス・フィンランドと科学技術・学術政策研究所(NISTEP)は、フォーサイトに関する共同研究において10年以上の実績がある。2019年9月から、日本及びフィンランドの両国において今後重要となる分野として、特にサーキュラーエコノミーを対象として共同研究を開始した。本プロジェクトの目的は、両国間でデルファイ調査を主としたフォーサイトの方法論を共有し、同方法で調査した結果を比較することで、日本とフィンランドにおいて重要な将来のイノベーションに資する科学技術を特定することである。

具体的には、NISTEPにて実施済の第11回科学技術予測調査に用いた702の科学技術トピックのうち、まずフィンランド側でサーキュラーエコノミーに関する161トピックを選出した。これら161トピックについてフィンランドでデルファイ調査及び専門家ヒアリングを実施し、その結果を日本の第11回科学技術予測調査のデータと比較することで、サーキュラーエコノミーに関連したトピックについて両国間の違いを明らかにした。結果の概要は以下のとおり：

- 各科学技術トピックの国際競争力と重要性の傾向は、日本とフィンランドでは真逆の相関関係がみられた。
- 例えば、農業、都市や環境に関する大部分のトピックは日本と比較してフィンランドの方が早期実現すると予想したが、他方、ICTと材料科学の多くのトピックは日本の方が早期実現すると予想した。
- 水や防災に関するトピックについて、国際競争力と重要度において日本とフィンランドの結果に大きな差がみられた。
- フィンランドにおいて追加の専門家ヒアリングを実施した結果を踏まえ、今後両国のイノベーションに資する可能性がある科学技術として、主に環境問題、バイオエコノミーに関する科学技術が挙げられた。また、食物等の関連トピックについても、COVID-19の世界的流行を受けて今後さらに加速する可能性がある。

デルファイ調査の結果は、両国の共通点だけでなく、サーキュラーエコノミーに関連する科学技術に対する日本とフィンランドの認識の差を明らかにした。その一方で、デルファイ調査のみでは両国間のフォーサイトとして十分とは言えず、方法論については引き続き検討する必要があることも明らかとなった。例えば、フィンランドのデルファイ調査設計においては、そもそもフィンランドにおける研究者人口が日本程多くないことから回答者数は多く望めない。従って、デルファイ調査の結果を最大限生かすとするれば、他のプロセス、例えば専門家ヒアリングやシナリオプランニングも併せて補う必要がある。今後はデルファイ調査の結果も踏まえたシナリオを引き続き検討する。

なお本報告書は、ビジネスフィンランド発行の英語報告書を和訳し、一部補足を加えたものである。詳細については英語版を参考のこと。

## 内容

概要.....	1
1. 本研究の背景と目的.....	3
1.1 共同研究の背景.....	3
1.2 サーキュラーエコノミーとは.....	4
1.3 本プロジェクトの目的.....	4
2. 方法.....	5
3. 結果概要.....	10
4. 分野別結果.....	12
4.1. 農林水産・食品・バイオテクノロジー.....	12
a. フードエコシステム.....	12
b. バイオマス.....	15
c. コミュニティ.....	18
4.2. 都市・建築・土木交通.....	21
a. 国土利用・保全.....	21
b. 都市・環境.....	24
4.3. 環境・資源・エネルギー.....	30
a. 資源開発・リデュース・リユース・リサイクル(3R).....	30
b. 水.....	34
c. 地球温暖化.....	37
4.4. ICT・アナリティクス・サービス.....	39
a. ネットワーク・インフラ.....	39
b. 産業・ビジネス・経営応用.....	42
c. 社会実装.....	45
4.5. マテリアル・デバイス・プロセス.....	48
a. 応用デバイス・システム(インフラ・モビリティ分野).....	48
b. 応用デバイス・システム(ライフ・バイオ分野).....	51
5. おわりに.....	54
参考文献.....	56

## 1. 本研究の背景と目的

### 1.1 共同研究の背景

フィンランドと NISTEP 間の協力は、2007 年にまでさかのぼる。当時、NISTEP は新しい科学技術予測調査手法の開発を模索していた。そこで、ビジネス、産業、社会を変化させるインパクトをもつ要素を抽出するという予測調査である FinnSight2015(2006 年発表)を発表したフィンランドから学ぶべきものがあると考え、当時のフィンランド技術庁(Tekes)との共同研究プロジェクトを 2007 年 10 月～2008 年 3 月に実施した。調査はそれぞれで独立して行ったが、実施プロセスは基本的に共通にした。進行状況については、適宜、両国の担当者同士で確認を行った。定期的に情報交換をすることで、お互いが調査プロセス進行のペースメーカーとなり、時間的に効率的なプロジェクト研究を実施することができた。また、フィンランドは日本に比べてデルファイ調査を予測調査に活用するという経験に乏しく、一方、日本はフィンランドに比べて社会的な内容を含んだテーマに対する予測調査の経験に乏しいなどがあり、意見交換を通じて手法の開発上に相互で得るものが多く、このことから、当時のフィンランドとの共同研究は有効であったといえた。今回の共同プロジェクトも、上記の前向きな結果を踏まえている。

NISTEP では、1971 年から約 5 年毎に科学技術予測調査を実施しており、科学技術基本計画が策定されるようになって以降、その策定スケジュールに合わせて調査を実施してきた。第 11 回科学技術予測調査（以下、第 11 回調査）では、第 6 期科学技術基本計画を始めとする科学技術イノベーション政策・戦略の検討に資する基礎的な情報を提供することを目的として、科学技術発展と社会の未来について検討を行った。近年では、調査の一環で、社会的課題など横断的なテーマを設定した検討や、分野の枠を超えた連携・融合の方向性の検討などにも併せて取り組んできた。第 11 回調査の結果は、広範な科学技術分野の中長期的発展に係る基盤の情報として意味を持つとともに、社会との関係性の検討や学際的検討の基情報としての役割を持つ。調査に設定した時間軸は、2040 年をターゲットイヤーとして検討は 2050 年までとした。

第 11 回調査における環境・資源・エネルギー分野においては、昨今の状況を踏まえサーキュラーエコノミーを含む細目を設定しており、日本だけでなく他国、特にサーキュラーエコノミーにおける先進国の意見も含めた深掘りは、第 11 回調査の日本の結果を改めて考察することに資すると考えられた。

一方でフィンランドでは、ビジネス・フィンランドが主体となって、フィンランドの研究者も参加したフォーサイトを実施することで、短～長期間で市場を創出できる可能性のある科学技術分野を検討していた。また、ビジネス・フィンランドはこれまでホライズン・スキャニングやシナリオプランニングを実施した経験はあるが、上述したとおり、デルファイ調査の経験は少なかった。そのため NISTEP との共同プロジェクトによって、特に長期計画において新しい洞察を生むと期待された。

## 1.2 サークュラーエコノミーとは

サーキュラーエコノミー(Circular Economy、以下 CE)を提唱した本『Waste to Wealth(無駄を富に変える)』によると、近年新興国経済が発展し、全世界的にエネルギーや原材料の需要が高まったことから、原材料の価格変動が予測できず、供給の不安定さに対応したコスト高が世界規模で問題となっている。現在の大量生産・大量消費型のビジネス形態を継続した場合、2030年には世界で約80億トン分の天然資源が不足し、その経済損失額は2030年時点で4.5兆米ドル、2050年時点では25兆ドルに達する見込みが発表されている。そして製品を生産・活用・廃棄、という従来型のビジネスモデルを継続している企業は、競争力を失ってしまう。こうした背景のもと提唱されたのがCEである。

CEは生産と消費の在り方を根本的に変える経済モデルである。CEは、製品・部品・資源を最大限に活用し、それらを消費することなく永続的に再生・再利用し続けるビジネスモデルでもある。いわゆる3R[リデュース(排出削減)、リユース(製品・部品の再使用)、リサイクル(資源の再生利用)]や、シェアリング・エコノミーなども含まれる。ここでは環境政策に限らず、資源を持続可能な形で活用することで、産業の活性化や雇用の促進につなげるというのが、CEの基本概念である。

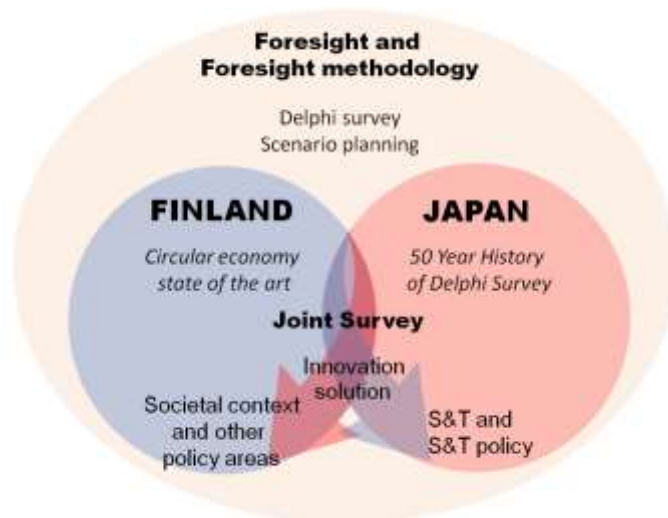
欧州を始めとして、世界各国でCEの取組が進められており、CEは大きな政策的潮流となっている。例えば、欧州委員会は、2015年12月にCEの実現に向けたEU共通の枠組みとして「サーキュラー・エコノミー・パッケージ」が採択された。これは、気候変動や環境課題に対処するとともに、雇用創出や経済成長、投資、社会的公正などを促進していくことで、EUが抱える広範な政治的課題に貢献することを目的としている。2020年には、CEアクションプランが公表された。

一方日本でも、2018年6月に「第四次循環型社会形成推進基本計画」が閣議決定され、2019年6月には環境省が循環型経済を目指す「CEチャレンジ」を発足した。また、2020年5月には、「循環経済ビジョン」が公表された。

## 1.3 本プロジェクトの目的

そこで、2019年デルファイ調査に約50年の実績がある日本のNISTEPと、CEの先進国であるフィンランドのビジネス・フィンランドは、CEに特化した共同プロジェクトを開始した。本プロジェクトの目的は、両国間でデルファイ調査を主としたフォーサイトの方法論を共有し、同方法で調査した結果を比較することで、日本とフィンランドにおいて重要な将来のイノベーションに資する科学技術を特定することである。共同プロジェクトの概要を図表1に示す。

図表 1 共同プロジェクトの概要



実際のプロジェクトはデルファイ調査から始めた。デルファイ調査は、同じ設問を2回繰り返す調査であるが、この2回目の結果が2019年11月までに分析されたあと、専門家によるワークショップと専門家のチェックによって補われ、最後に日本の結果と比較された。2020年3月のCOVID-19のパンデミックにより、計画していたワークショップは部分的に実施することとなった。また、最終結果は4月～5月に専門家によるweb会議で議論された。

なお本報告書は、ビジネスフィンランド発行の英語報告書を和訳し、一部補足を加えたものである。詳細については英語版を参考のこと(参考文献1)。

## 2. 方法

先述したとおりNISTEPは既に図表2に示す7分野合計702のトピックを設定し、第11回科学技術予測調査を実施した。このデータをフィンランド側へ提供した。提供したトピックは、分野、細目、トピックと続く階層構造になっている。

図表 2 各分野の細目及び科学技術トピック数

	分野	細目	トピック数
1	健康・医療・生命科学 (計 96 トピック)	医薬品(再生・細胞医療製品、遺伝子治療製品を含む)	20
		医療機器開発	12
		老化および非感染性疾患	19
		脳科学(精神・神経疾患、認知・行動科学を含む)	10
		健康危機管理(感染症、救急医療、災害医療を含む)	10
		情報と健康、社会医学	13
		生命科学基盤技術(計測技術、データ標準化等を含む)	12



	分野	細目	トピック数
2	農林水産・食品・ バイオテクノロジー (計 97 トピック)	生産エコシステム	19
		フードエコシステム	12
		資源エコシステム	14
		システム基盤	12
		次世代バイオテクノロジー	15
		バイオマス	9
		安全・安心・健康	9
		コミュニティ	7
3	環境・資源・ エネルギー (計 106 トピック)	エネルギー変換	25
		エネルギーシステム	12
		資源開発・リデュース・リユース・リサイクル(3R)	28
		水	12
		地球温暖化	7
		環境保全(解析・予測・評価、修復・再生、計画)	16
		リスクマネジメント	6
4	ICT・アナリティクス・ サービス (計 107 トピック)	未来社会デザイン	5
		データサイエンス・AI	11
		コンピュータシステム	12
		IoT・ロボティクス	9
		ネットワーク・インフラ	11
		セキュリティ、プライバシー	10
		サービスサイエンス	12
		産業・ビジネス・経営応用	10
		政策・制度設計支援技術	8
		社会実装	10
		インタラクション	9
5	マテリアル・デバイス・ プロセス (計 101 トピック)	物質・材料	11
		プロセス・マニュファクチャリング	12
		計算科学・データ科学	13
		先端計測・解析手法	16
		応用デバイス・システム(ICT・ナノエレクトロニクス分野)	14
		応用デバイス・システム(環境・エネルギー分野)	9
		応用デバイス・システム(インフラ・モビリティ分野)	11
		応用デバイス・システム(ライフ・バイオ分野)	15
6	都市・建築・土木・ 交通 (計 95 トピック)	国土利用・保全	11
		建築	12
		社会基盤施設	11
		都市・環境	9

	分野	細目	トピック数
		建設生産システム	9
		交通システム	12
		車・鉄道・船舶・航空	13
		防災・減災技術	9
		防災・減災情報	9
7	宇宙・海洋・地球・ 科学基盤 (計 100 トピック)	宇宙	11
		海洋	10
		地球	13
		観測・予測	10
		計算・数理・情報科学	11
		素粒子・原子核・加速器	9
		量子ビーム:放射光	12
		量子ビーム:中性子・ミュオン・荷電粒子等	13
		光・量子技術	11
	計	59 細目	702

続いて、上記のトピックの内、今回の対象であるサーキュラーエコノミーに関するトピックをフィンランド側で抽出した。抽出は細目単位で行われた。最終的に選ばれたトピックを図表3に示す。

図表 3 フィンランドがデルファイ調査に用いた分野・細目およびトピック数

分野	細目	トピック数
農林水産・食品・ バイオテクノロジー	フードエコシステム	12
	バイオマス	9
	コミュニティ	7
環境・資源・ エネルギー	資源開発・リデュース・リユース・リサイクル(3R)	28
	水	12
	地球温暖化	7
ICT・アナリティクス・ サービス	ネットワーク・インフラ	11
	産業・ビジネス・経営応用	10
	社会実装	9
マテリアル・デバイス・ プロセス	応用デバイス・システム(インフラ・モビリティ分野)	11
	応用デバイス・システム(ライフ・バイオ分野)	15
都市・建築・土木・ 交通	国土利用・保全	11
	都市・環境	9
	建設生産システム	9
計		161

本共同プロジェクトの目的の1つは、同じ設問に対する回答の違いを比較することであるため、フィンランドは、図表4に示すようにNISTEPの調査質問表をそのまま使用した。ただし、自国に対する認識を問う項目については、日本の場合は日本、フィンランドの場合はフィンランドと、それぞれ自国に対する認識を質問した。ただし、フィンランドでは個人情報収集せず、性別、年齢または所属情報は調査対象外とした。

フィンランドでは、アンケートは合計14,221人の自国の研究者に電子メールで送付し、全体で254人から回答を得た。その後、二国間での結果を比較する上で回答数が一部少ないトピックが存在することもあり、追加的に専門家ヒアリングを実施した。

図表 4 質問項目

項目	内容	選択肢
<b>重要度</b> (単数選択)	30年後の望ましい社会を実現する上で、日本/フィンランドにとっての現在の重要度	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない [集計時、非常に高い(+2)、高い(+1)、どちらでもない(0)、低い(-1)、非常に低い(-2)として指数化]
<b>国際競争力</b> (単数選択)	現在の日本/フィンランドが置かれた国際競争力の状況	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない [集計時、非常に高い(+2)、高い(+1)、どちらでもない(0)、低い(-1)、非常に低い(-2)として指数化]
<b>科学技術的実現予測時期</b> (単数選択)	日本/フィンランドを含む世界のどこかで科学技術的に実現する時期	実現済、～2025年、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年～、実現しない、わからない
<b>科学技術的実現に向けた政策手段</b> (複数選択可)	科学技術的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、研究開発費の拡充、研究基盤整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的・法的・社会的課題への対応、その他
<b>社会的実現予測時期</b> (単数選択)	日本/フィンランドを含む世界のどこかで科学技術的な実現に続き、日本で社会的に実現する時期	実現済、～2025年、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年～、実現しない、わからない
<b>社会的実現に向けた政策手段</b> (複数選択可)	日本/フィンランドでの社会的実現時期に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、事業補助、事業環境整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的・法的・社会的課題への対応、その他

日本での回収状況は以下のとおりである。本共同プロジェクトにおいては、2回目アンケート回答を最終回答として比較対象とした。

#### 1回目アンケート (R1)

実施時期： 2019年2月20日～3月25日

回答者： 6697名

#### 2回目アンケート (R2)

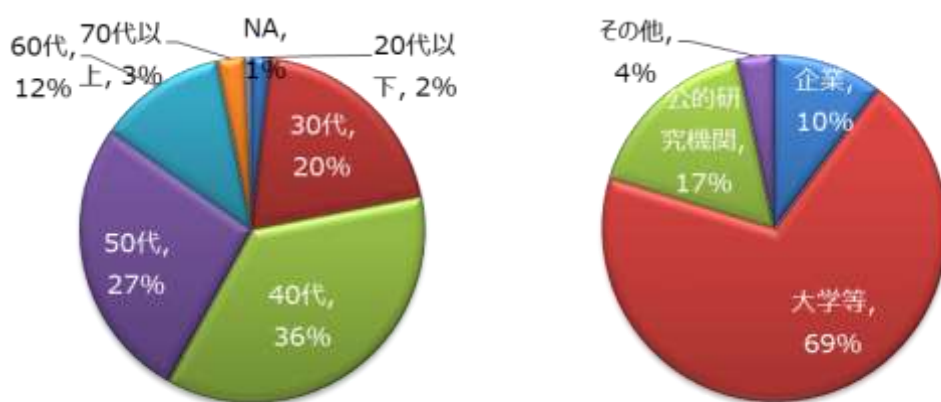
実施時期： 2019 年 5 月 16 日～6 月 14 日

回答者：5352 名

最終回答者数は 5352 名である。その年代、所属属性を図表 5 に示す。

年代については 30 代 20%、40 代 36%、50 代 27%と、この 3 区分で全体の 8 割を占める。所属機関種別では大学等が 69%を占め。また、性別比では男性が 86%と大多数を占め、職種では研究・開発従事者が 87%と大多数を占める。職種については、研究開発従事者が 87%を占める。

図表 5 回答者の属性



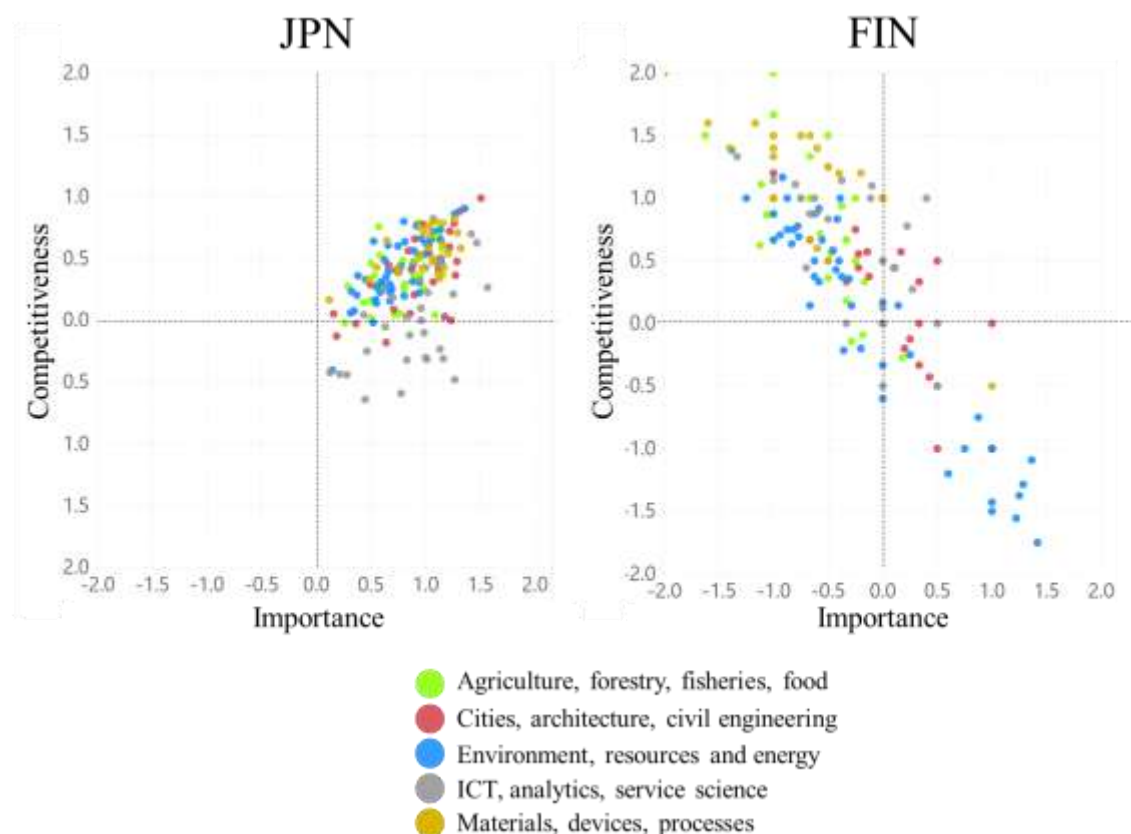
### 3. 結果概要

結果概要は以下のとおりである。重要度及び国際競争力の全体概要を図表6、実現年予測の全体概要を図表7に示す。

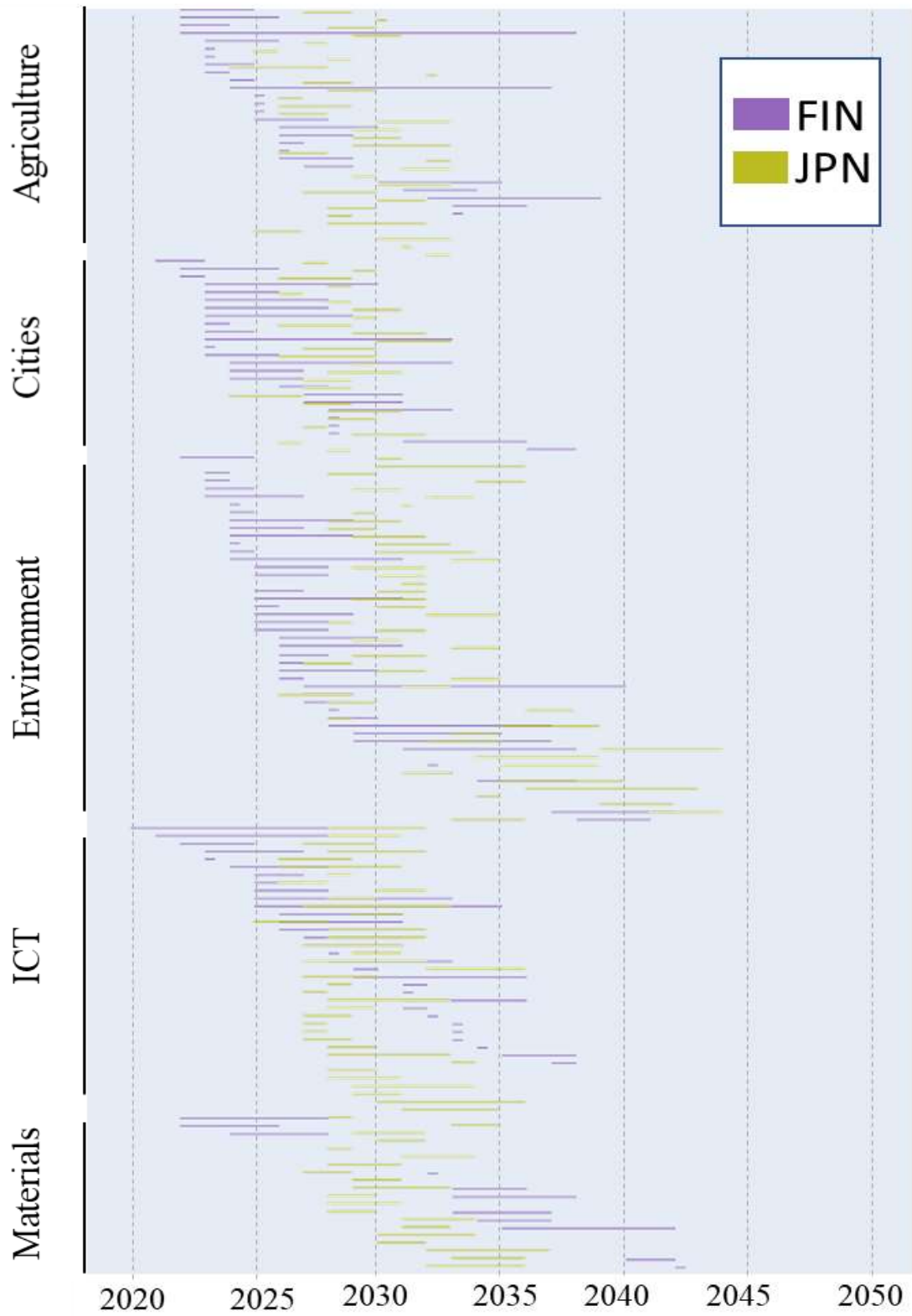
- 国際競争力と重要度は日本では正の相関関係があり、重要度の高いトピックは国際競争力も高い傾向となった。
- 一方で、フィンランドは日本とは真逆の結果となった。重要度の高いトピックは、国際競争力が低い傾向となった。
- 大部分の農林水産・食品・バイオテクノロジー分野、都市・建築・土木・交通分野、環境・資源・エネルギー分野のトピックは、フィンランドでは日本より早期に実現されると予想された。
- 多くのICT・アナリティクス・サービス分野とマテリアル・デバイス・プロセス分野のトピックは、日本がフィンランドよりも早期に実現されると予想された

また、図表6に示すように、日本では結果のばらつきは少ないが、フィンランドでは結果が大きくばらついた。

図表 6 日本とフィンランドの国際競争力・重要度比較



図表 7 科学技術的/社会的実現予測時期の比較



(左端は科学技術的実現、右端は社会的実現)

## 4. 分野別結果

### 4.1. 農林水産・食品・バイオテクノロジー

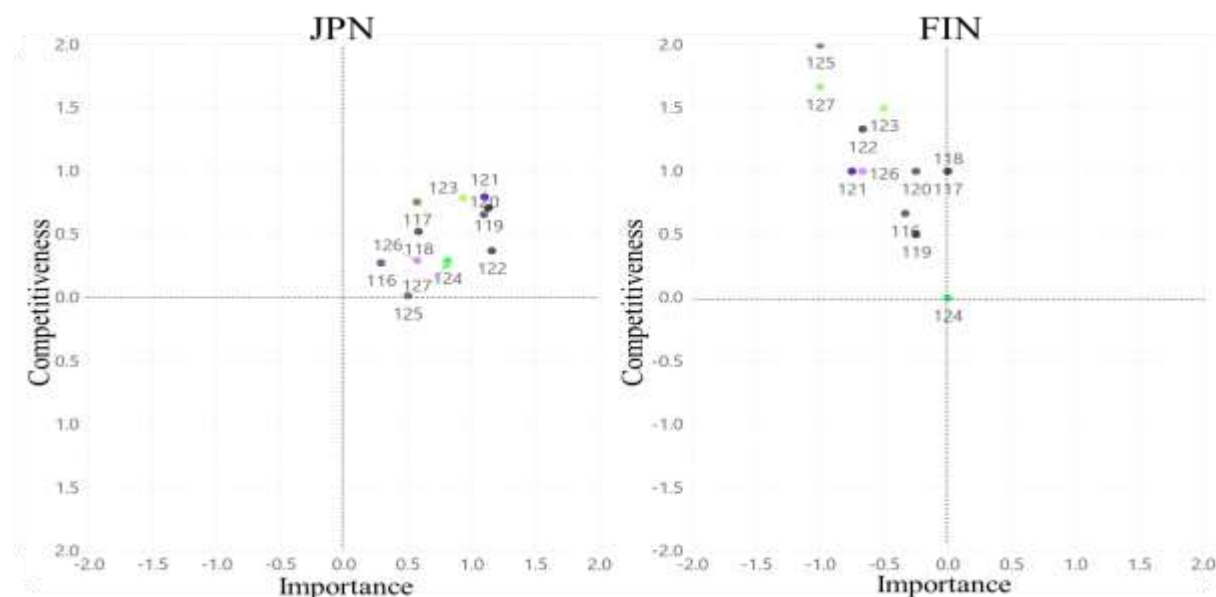
#### a. フードエコシステム

図表 8 トピックリスト

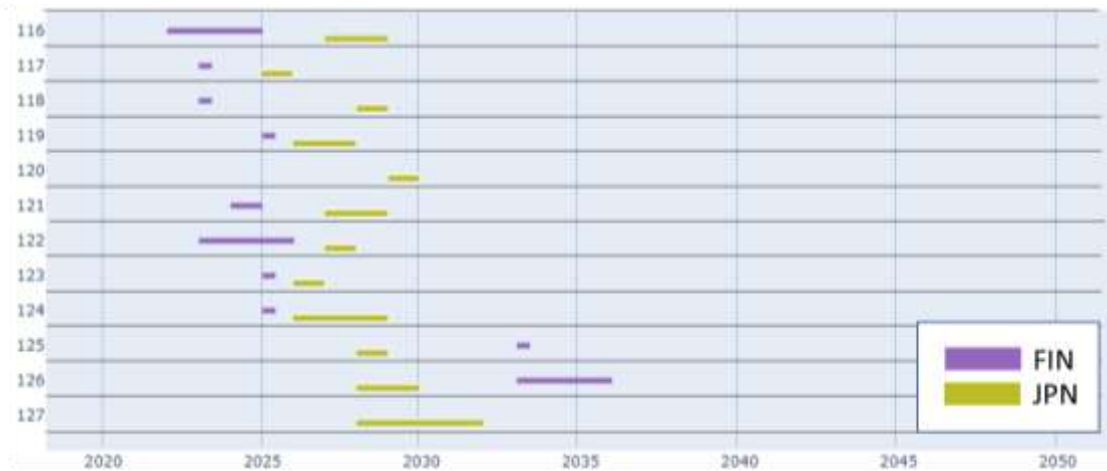
ID	トピック
116	飲食店用の多様なメニューに対応可能なフレキシブル調理システム
117	食品生産ラインにおける有機物(毛髪など)の混入検出のための識別技術
* 118	「美味しさ」を簡便に再現するための、味覚・香り・食感(テクスチャ)を考慮した認知科学・言語学・化学・AIなど分野融合的なアプローチによる研究成果の国際的なデータベース化
119	農林水産物の品質(成分・物性・熟度)を生産現場で非破壊でリアルタイムに定量分析するシステム
120	アレルギー計測技術に基づいたアレルギーを起こさない食品の製造技術
121	高齢社会を意識したフードミックスの考え方に基く多様な機能性食品
122	食品ロスの低減に向けたフードバリューチェーンのモニタリング・解析技術
123	冷凍せずに生鮮食料品の鮮度と品質を維持するための短期保蔵技術
124	昆虫資源を含む新規タンパク源の製造加工技術
* 125	生産場所から消費場所への距離短縮(Footprints 改善)に向けたマスカスタマイゼーション実現の製造・加工・調理技術
126	廃棄食品再利用による新規資源生成技術(例えばフード3D プリンターのような)
127	生産・流通・加工・消費を通した完全循環型フードバリューチェーン

\*本トピックはフィンランド側の回答者数が少なかった(2名)。

図表 9 重要度及び国際競争力比較



図表 10 実現年予想の比較



## 結果概要

- 日本で最も重要度の高いトピックは、「食品ロスの低減に向けたフードバリューチェーンのモニタリング・解析技術」であった。
- 多くのトピックが、フィンランドがより早期に実現すると予想された。
- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「飲食店用の多様なメニューに対応可能なフレキシブル調理システム」であった。

	科学技術的実現時期	社会的実現時期
フィンランド	2023	2026
日本	2027	2028

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「生産場所から消費場所への距離短縮 (Footprints改善)に向けたマスカスタマイゼーション実現の製造・加工・調理技術」であった。

	科学技術的実現時期	社会的実現時期
フィンランド	2033	2036
日本	2028	2030

## ヒアリング結果と考察

日本では、「生産場所から消費場所への距離短縮 (Footprints改善)に向けたマスカスタマイゼーション実現の製造・加工・調理技術」と「廃棄食品再利用による新規資源生成技術 (例えばフード3Dプリンターのような)」のようなトピックがフィンランドよりも早く実現されると予想された。

フィンランドは、食品の安全と信頼を重要視しており、フィンランドの食品業界はセンサー技術を広範囲に使用しており、現在も成長し続けている。フィンランドで食糧生産のために使われる原料



は高品質である。そのため、フィンランドにおける重要度が低かったのは、フィンランドのフードエコシステムが既に高品質であるという事実に起因している可能性が考えられる。

ただし、たとえフィンランドのフードエコシステムがうまくいっているとしても、改善の余地はまだある。フィンランドの人々は、特に消費者データのアクティブ・ユーザーでない。また、フィンランドの食品業界は小規模で、大きな研究開発予算もない。

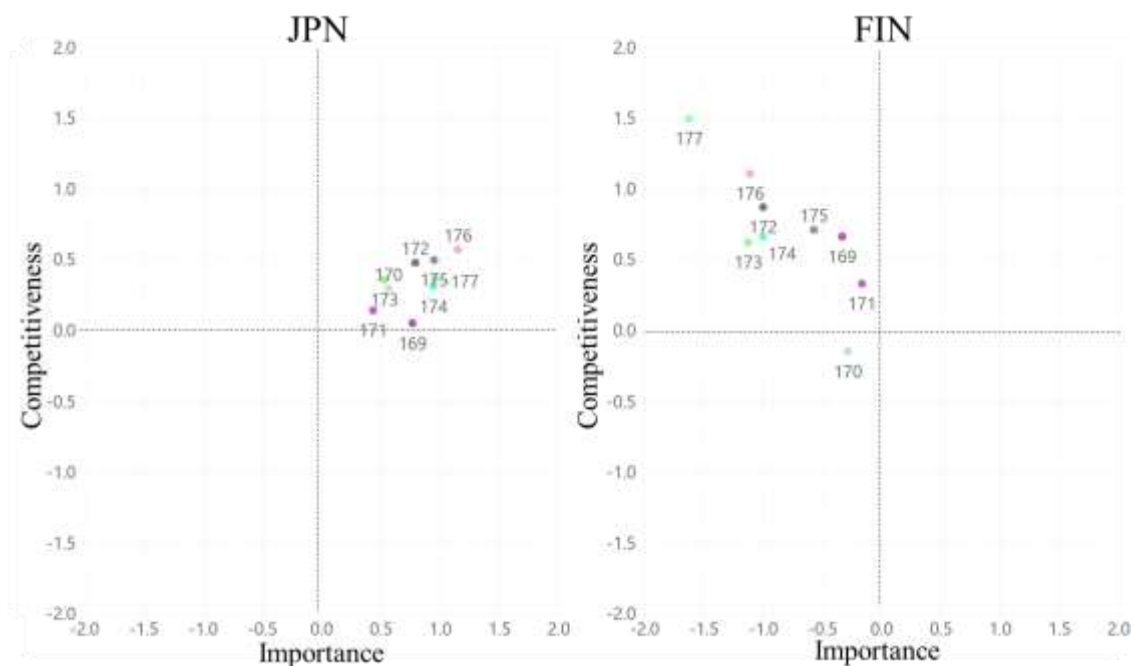
COVID-19 は食物システムを崩壊させ、消費者行動と供給にも影響する。迅速でフレキシブルな生産技術は、食糧生産と配達における人と人との接触を最小にとどめる方法として重要性を増す可能性がある。人口の高齢化と食品の安全は、日本だけでなく世界中の多くの国の重要な懸念であるが、特に人口が減少している日本の社会では、料理のオートメーションや人工食品、食品貯蔵技術の開発がAIの進歩で促進され続けると予想される。

b. バイオマス

図表 11 トピックリスト

ID	トピック
169	乾物で 50t/ha/年を超えるバイオマス生産作物の作出
170	セルロースの結晶度を緩和させる人工タンパク質の利用による植物性繊維の分解利用技術
171	メタン発酵消化液の濃縮等による成分安定肥料生産技術を利用した耕畜連携生産システム
172	CO <sub>2</sub> 排出削減の難しい鉄鋼・セメント(鉄筋コンクリート)の代替による CO <sub>2</sub> 削減が期待できる、中高層木造建築物を実現するための高強度木質部材開発に基づく木質耐火構造設計技術
173	土木分野等での需要拡大を目的とする、屋外で 50 年程度の長期使用可能な高耐久木材
174	木材等バイオマスによる高効率・低コストな発電・熱利用技術
175	フードエコシステムに関わる生分解性、光分解性素材
176	森林資源による化石資源由来製品の代替化のための技術(道路舗装、建築用材、服飾素材、塗料、消費財)
177	木材副産物の付加価値化技術(収穫時の端材や規格外産物、加工ラインでの可食廃棄物の再利用・精製・分離・抽出技術)

図表 12 重要度及び国際競争力比較



結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「メタン発酵消化液の濃縮等による成分安定肥料

生産技術を利用した耕畜連携生産システム」であった。

- 日本で最も重要度の高いトピックは、「森林資源による化石資源由来製品の代替化のための技術（道路舗装、建築用材、服飾素材、塗料、消費財）」であった。

図表 13 実現年予想の比較



- 多くのトピックで、フィンランドが先に実現すると予測された。
- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「木材副産物の付加価値化技術（収穫時の端材や規格外産物、加工ラインでの可食廃棄物の再利用・精製・分離・抽出技術）」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2022	2026
日本	2030	2030

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「セルロースの結晶度を緩和させる人工タンパク質の利用による植物性繊維の分解利用技術」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2032	2039
日本	2030	2033

## ヒアリング結果と考察

日本では、製造に関するトピック（例えばセルロースの結晶化度に関連した有機合成または化学反応）がフィンランドより早く実現されると予想される。

フィンランド結果において、全体的に国際競争力が高い。林業はフィンランド経済の長年の基礎

であることから、これは順当な結果と言える。フィンランドのバイオマス産業は、サーキュラーエコノミーにおいて重要な部分である、副産物の利用にも強みを持つ。今回の重要な所見の 1 つは、セルロースは日本では食品レベルのグレードであるが、フィンランドではそうではないにも関わらず、強みを持つとされたことである。マクロ農業と食物連鎖における循環は、興味深い新興分野である。

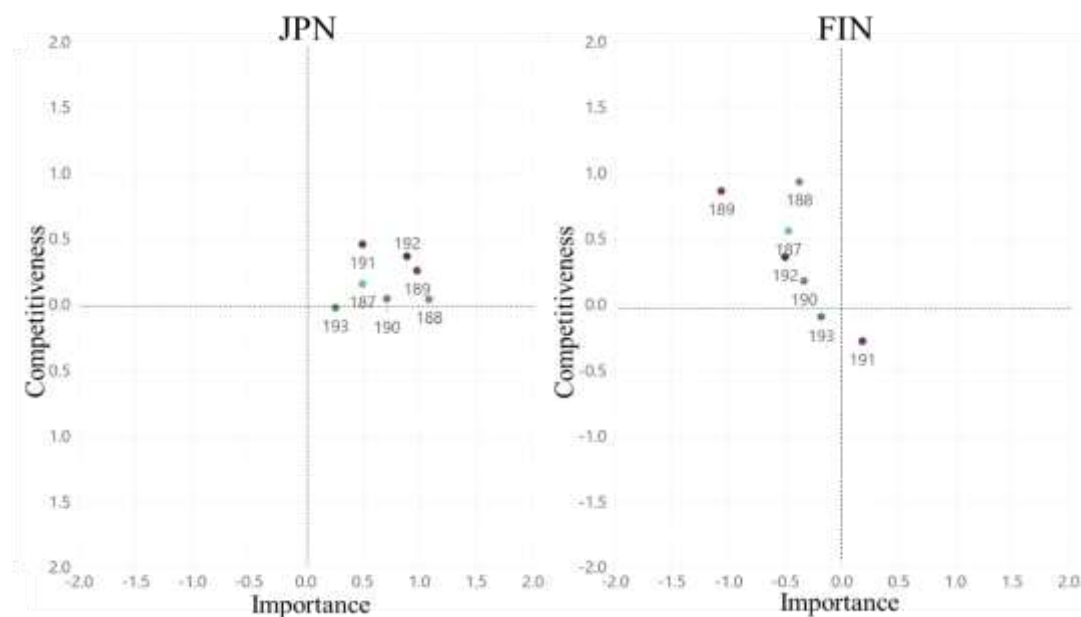
バイオマスにおける主要なトピックは、(1) 高収量作物の生産技術などのバイオマス生産、(2) 高強度木材部材の開発に基づく耐火木材構造設計技術などのバイオマスの需要の拡大、(3) 食品生態系に関連する生分解性、および(4) 光分解性物質などの化石資源の代替、である。後者、すなわち化石資源の代替は、フィンランドよりも日本でより重要であると評価されている。今後の社会においては化石資源を使わず、それをバイオマス等に置き換えていくことが求められている。そのため、バイオマスによりどこまで代替できるかを追求することが必要である。そのことにより、CO<sub>2</sub>を排出しない社会を現出し、地球温暖化の防止を図っていかなければならない。そのことは、農林水産業、農山村社会の振興にもつながる。

c. コミュニティ

図表 14 トピックスリスト

ID	トピック
187	森林や木材の快適性増進効果の生理的解明に基づく森林療法
188	世界の人口増、経済発展及び作物生産技術の動向を踏まえた食料の需給予測システム
189	バイオマス等再生可能エネルギーを利用した社会の経済的活力・社会影響・環境負荷等を評価する技術
190	水産資源管理のための人文社会科学と AI を駆使した社会システム
191	伝統的な調理法の再評価システム
192	水産物のトレーサビリティを確立する社会システム
193	最先端デジタル技術を用いたコミュニティの可視化モニタリング技術

図表 15 重要度及び国際競争力比較



結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「伝統的な調理法の再評価システム」であった。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「世界の人口増、経済発展及び作物生産技術の動向を踏まえた食料の需給予測システム」であった。

図表 16 実現年予想の比較



- 全てのトピックで、フィンランドが先に実現されると予想された。
- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「水産資源管理のための人文社会科学とAIを駆使した社会システム」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2025	2028
日本	2030	2033

## ヒアリング結果と考察

本細目の全てのトピックで、フィンランドが日本より先に実現されることになった。本細目では、データの所有権、共有、透明性が非常に重要な要素となる。現在、小売部門には、消費者データの共有に関して完全にオープンなポリシーがない。これは、開発を遅らせ、妨げる可能性がある。

将来的には、個人のニーズや地域ごとの需給予測に基づいて、廃棄物を出さずに食料を供給できるようになる必要がある。サーキュラーエコノミーと共に、地産地消も求められる。コンビニエンスストアやレストランチェーンも、ミクロの社会に応じて柔軟にその形態や提供内容を変えることが求められている。一方、オンラインレシピや栄養管理、予防的健康のモニタリング、予測、アドバイス、および食事療法には大きな期待が寄せられている。データ主導の仮想コミュニティと実際のコミュニティのバランスは、継続的に見直される必要がある。

世界的な人口増加に対応するには、極めて効率的で持続可能な食糧生態系が必要であり、対応する技術の重要性もそれに応じて増加することは間違いない。従来のレシピの再評価は、特に動物性タンパク質の消費量を削減する必要性と、植物ベースの代替品を見つける必要性を考慮すれば、将来的に非常に重要な領域として浮上する可能性がある。植物バイオテクノロジーは、今後さらに興味深い分野となることが期待される。

フィンランドは食糧生産の面で非常に自給自足型であるため、フィンランドの観点から見ると、これらの調査結果におけるこれらのテクノロジーの重要性は依然としてかなり低いように見える。この領域の重要な技術分野の1つは、拡張現実の利用である。

今後、日本では価値観の多様化にともない、経済活動としての食糧生産・供給から、生きがいや

幸福感を高める食糧生産・供給へのシフトが予想される。地域や社会環境に応じて個々のライフスタイルが見直され、より細分化されたマーケットの需要が生じられると思われる。一方 AI や 5G などの技術開発の結果、データ駆動型のコミュニティも発展しつつある。このような状況下では従来の基礎研究―経済活動の距離感がぐっと縮まり、科学技術が社会に浸透する即効性も高められる。ネット社会の確立で人の疎遠化が進む一方、地域社会の中では人と人のつながりが見直され、コミュニティを形成し、新たな生きがいや価値観がローカル・トレンドとして共有される。地域社会のニーズに見合った食糧生産・供給も環境負荷の観点から限りなく地産地消に近づき、他地域との食文化の交流・共有も可能ながら、地域内での循環経済に貢献する科学技術が食分野でも期待される。

日本の大都市では既にシニア世代向けの集合住宅、子育て世代向けの居住地域などと、複合施設の隣接で生活の利便性が高まりつつあるが、今後それぞれの世代やライフスタイルに見合った生活がしやすい居住施設や住環境は、リモートワークの普及と共に更に進化すると思われる。ワークライフバランスや自分らしさを見直して自己啓発を求める人らが主導となって人と人とのつながりが広がり、地域社会の中で共通の価値観を持つ者同志が次第に集まりコミュニティを形成していく。食の位置づけはこの中でも趣味と並んで重要と考えられ、生産活動から供給、調理、消費までコミュニティ構成員のネットワークと密接な関係を保ち、政府や業界主導でない、生活者主導のミクロ社会が形成されていくことが期待される。

## 4.2. 都市・建築・土木交通

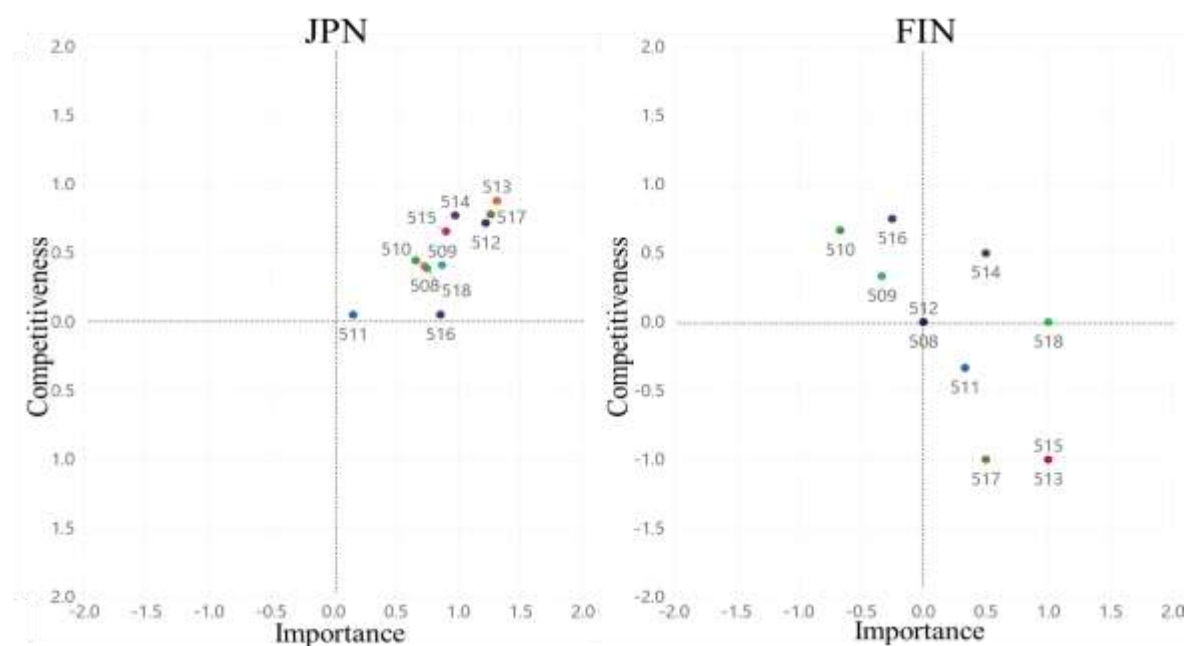
### a. 国土利用・保全

図表 17 トピックスリスト

ID	トピック
508	海域環境保全と両立する浮遊式構造物(交通、通信、生産、活動基地等)
509	下水に含まれる貴重金属等の資源回収とエネルギー自立化のための下水道技術
510	地下水質・流動観測推定技術
511	適切な国際的管理のための、非持続的にしか利用できない地下水(化石水)の全世界的な埋蔵量の推計
512	予測と観測を合わせ、破堤を事前に察知する技術
513	破堤箇所の迅速な締切等、河川堤防の変状発生時の緊急復旧技術
514	長期的な環境保全・維持管理を統合した河道設計技術
515	流砂系の推定に基づいて山地や海岸線等の国土変化を予測し、適切に国土を保全する技術
516	日本国内を旅行する、全ての国の旅行者が、いつでもどこでも、観光地や移動に必要な情報提供と支援を受けることができ、インバウンド観光を円滑・快適に楽しめる
517	準天頂衛星の測位データを利用し、国土や大型構造物の変化や災害時の変状をリアルタイムで定量的に判定する技術
* 518	適切な発生源対策の実施に必要となる、マイクロプラスチックの生成メカニズムおよび公共水域における負荷実態を解明する技術

\*本トピックはフィンランド側の回答者数が少なかった(2名)。

図表 18 重要度及び国際競争力比較

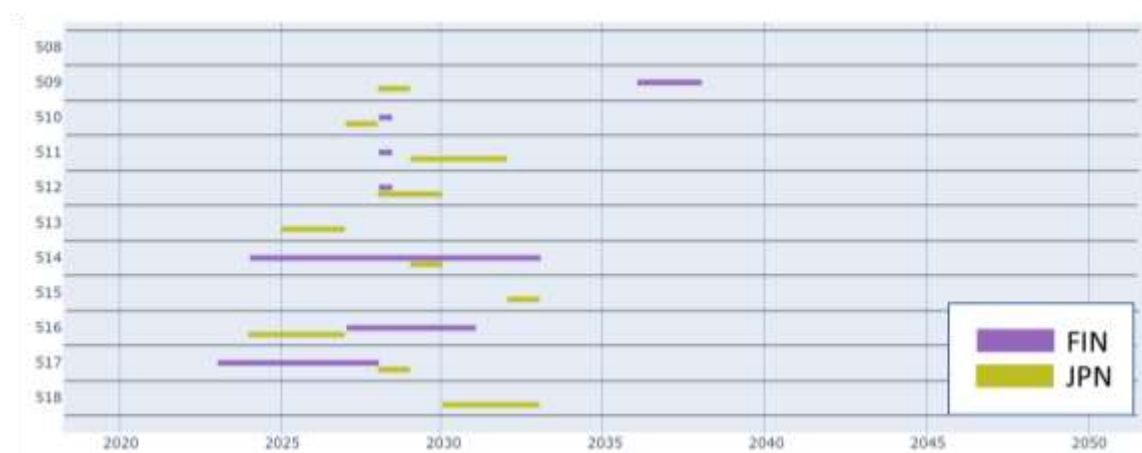




## 結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「破堤箇所の迅速な締切等、河川堤防の変状発生時の緊急復旧技術」、「流砂系の推定に基づいて山地や海岸線等の国土変化を予測し、適切に国土を保全する技術」、「適切な発生源対策の実施に必要となる、マイクロプラスチックの生成メカニズムおよび公共水域における負荷実態を解明する技術」であった。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「破堤箇所の迅速な締切等、河川堤防の変状発生時の緊急復旧技術」であり、これはフィンランドでも同じだった。

図表 19 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「準天頂衛星の測位データを利用し、国土や大型構造物の変化や災害時の変状をリアルタイムで定量的に判定する技術」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2023	2026
日本	2027	2028

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「下水に含まれる貴重金属等の資源回収とエネルギー自立化のための下水道技術」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2033	2036
日本	2028	2030

## ヒアリング結果と考察

日本では、下水処理に関連したトピックがフィンランドより早く実現されると予想された。日本はしばしば洪水のために損害を受け、過去には水質汚染も経験しており、現在は高水準の技術を持つ。

フィンランドの地理的位置、天然資源、人口密度の低さが、結果の考察をするうえで重要である。フィンランドには常に豊富な淡水と土地があり、人口密度も低いため、国土利用は大きな問題ではなかった。フィンランドではこれらの技術の重要度は必ずしも日本と同じではないが、原子力や都市における水流監視技術など、フィンランドの観点からも価値のあるニッチな領域がある。下水から金属を回収したり、淡水からマイクロプラスチックを回収したりする技術は、フィンランドでもますます重要になると予測される。一方で防災は、日本ほど重要ではない分野である。

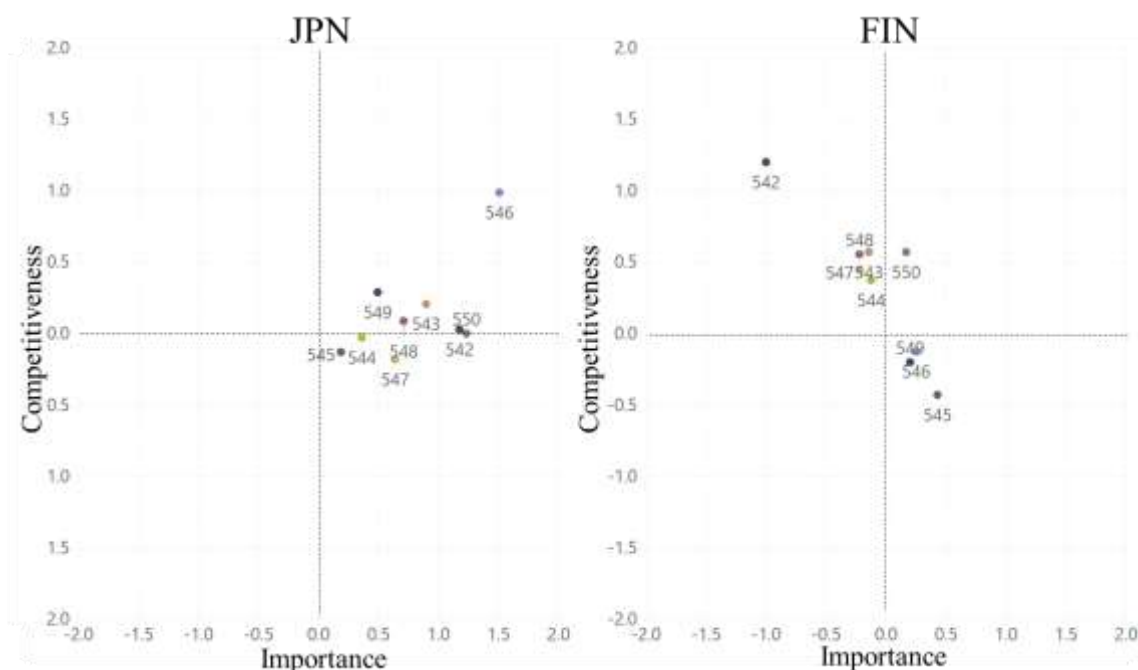
日本の結果を重要度の観点から見ると、河川堤防の緊急復旧技術、準天頂衛星の測位データを利用した国土や大型構造物のモニタリングといった、防災に関係するものの評価が高く、河川環境の保全に関するものが続いた。近年の大規模水害の多発や、気候変動に伴って、さらなる水害の頻発、激甚化が予測されている現状を反映して、防災に関係する技術の重要度が高く評価されたと思われる。また同時に、河川環境の保全に関わるトピックへの関心の高さもうかがえる。防災と環境保全を両立した国土利用・保全が強く求められている。このために、国土の強靱化を進めるとともに、環境分野での人材や体制強化の必要性が高いと考えられる。

b. 都市・環境

図表 20 トピックスリスト

ID	トピック
542	都市に関するオープンデータ化を図り、多様な主体が保有するデータを共有・連携して活用できるプラットフォーム
543	自然が持つ多様な機能を活かして整備されるグリーンインフラの包括的・効率的な整備・維持管理及び定量的評価技術
544	合理的な居住地選択行動を促進するナッジ型の住宅情報提供システム(行動科学の知見を用いた、自発的に望ましい選択を促す仕掛けを有する住宅情報提供システム)
545	広域のインフラストラクチャーから独立した住宅地
546	詳細な都市計画を可能にする精度の高い災害ハザードマップの作成技術
547	時間や場所に縛られることなく、都市計画についての議論や意思決定ができる合意形成支援システム
548	詳細な都市計画(ゾーニングや都市施設の整備)を可能にする、土地利用変化のモニタリングおよび適正な都市計画手法の提案システム
549	開発がもたらすミクロな変化を正確に評価する環境アセスメント技術
550	人口減少にともなって発生する低未利用地の粗放的な維持管理技術

図表 21 重要度及び国際競争力比較



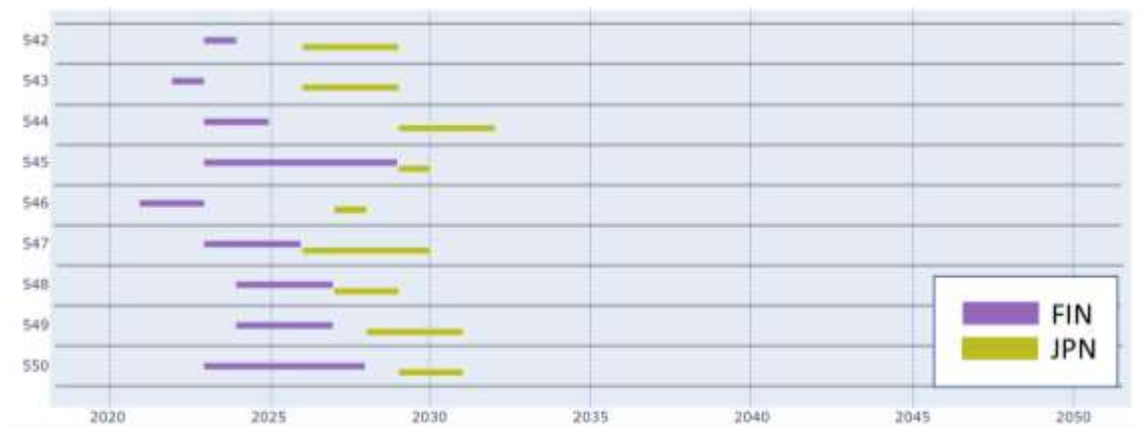
結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「広域のインフラストラクチャーから独立した住宅地」

であった。

- 日本で最も重要度の高いトピックは、「詳細な都市計画を可能にする精度の高い災害ハザードマップの作成技術」であった。

図表 22 実現年予想の比較



- すべてのトピックは、フィンランドの先に実現されることになっている。
- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「人口減少にともなって発生する低未利用地の粗放的な維持管理技術」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2023	2028
日本	2029	2031

## ヒアリング結果と考察

フィンランドの回答者が、これらの技術が早期に実現・実装されると考える理由の1つは、フィンランドの都市構造が日本よりも小さく、複雑でないことである。つまり、日本に比べてシンプルなソリューションが機能し、かつ効果的である。また、情報共有はフィンランド社会の強みの1つであり、都市および環境分野における技術の急速な発展と普及に貢献することができる。

フィンランドは5G技術のための世界に通用するテスト環境を開発した。そして、都市部のデジタル・インフラは、デジタルベースのパイロットモデルを、多くのスマートな都市イニシアティブ(たとえばサービス・デモ・エリア(スマートな Otaniemi、ラックス Turrin プロジェクト、その他のモビリティ)として整備した。これは、密集した市街化区域で新しい全体的な都市サービス(例えば円滑な交通都市情報の流れと監視システム)の開発のために、特に重要である。

本細目の全てのトピックが、フィンランドで先に実現すると予想された。特に、行動科学テーマの実現は日本で比較的遅く、データ共有の重要性が読み取れる。

すでに述べたように、フィンランドはできるだけデータをオープンにし、スマートシティデータによる世界的なフロントランナーとなり得ることが明らかとなった。フィンランドは、都市エリアを長年の伝統に基づきグリーンビルディングとしている。この伝統は、都市計画におけるフィンランドの高い競争力

を説明する上で重要である。防災はフィンランドではあまり重要ではないが、地図やナビゲーション技術はフィンランドでは非常に高度であり、たとえば火災安全計画でも広く使用されている。レーザー読取りのような空中調査技術が開発され、森林や都市計画プラットフォーム・データの収集、マッピングとモニタリングに使用されている。全体として、フィンランドの競争力が、日本より高い傾向にある。都市のモニタリングは、フィンランドにおける国際競争力の高い技術であり、国際的なビジネスチャンスが拡大される可能性がある。

日本では、頻発する災害を受けてか、災害ハザードマップの作成技術(546「詳細な都市計画を可能にする精度の高い災害ハザードマップの作成技術」)が重要度、国際競争力ともに高いスコアであった。地球環境の変動は日本だけの問題ではなく、世界的にも取り組む意義がある課題だろう。重要だが国際競争力がそれほどでもない項目はオープンデータのプラットフォーム(542「都市に関するオープンデータ化を図り、多様な主体が保有するデータを共有・連携して活用できるプラットフォーム」)と未利用地の粗放的な維持管理技術(550「人口減少にともなって発生する低未利用地の粗放的な維持管理技術」)であり、これらは日本固有の問題であることが示唆される。住宅地についての2項目(544「合理的な居住地選択行動を促進するナッジ型の住宅情報提供システム(行動科学の知見を用いた、自発的に望ましい選択を促す仕掛けを有する住宅情報提供システム)」、545「広域のインフラストラクチャーから独立した住宅地」)は回答者も少なく、重要度がそれほど高くなく、国際競争力も低い。このこともあって技術の実現見込みが遅いという回答が得られている。

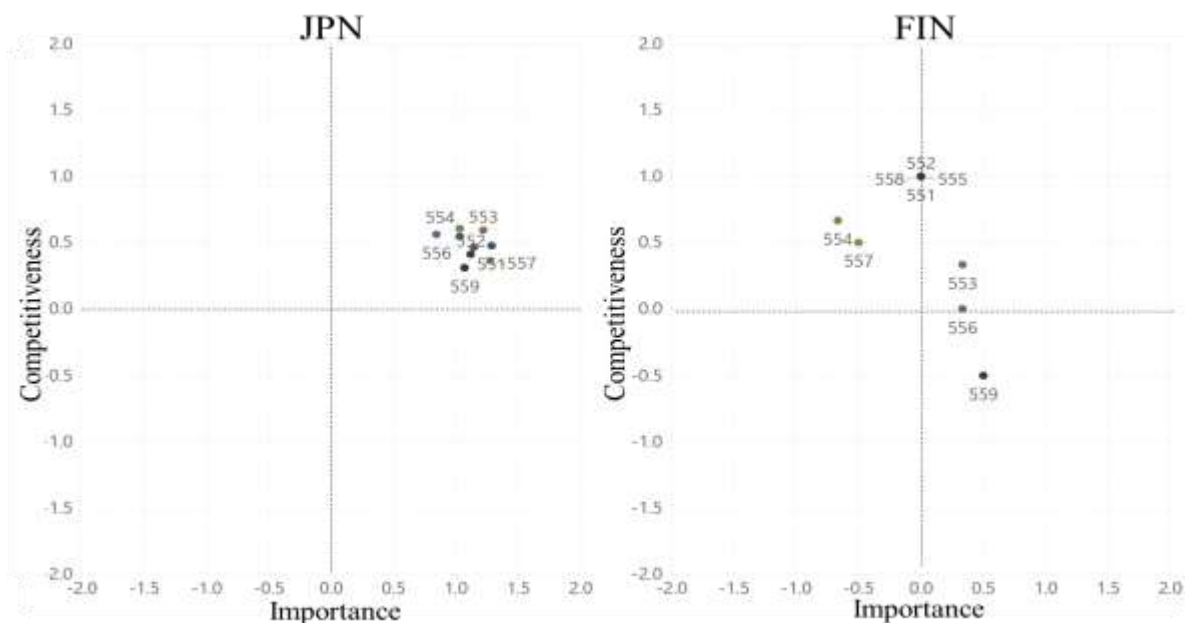
c. 建設生産システム

図表 23 トピックリスト

ID	トピック
551	設計・施工・過去の点検データに基づき、ロボット・センサーが自動的・自律的に点検・診断し、異常を発見・通知する技術
* 552	ダイナミックな情報、自動的な更新情報の収集も含めた、国土基盤となる電子地図
553	設計データを基盤としつつ、作業条件の変化や周辺の施工状況等を感知し、自律的に施工が可能な無人建設機械
554	カメラや生体センサー情報等に基づき、作業員の作業環境(高所作業、クレーン旋回範囲、熱中症等)を常に把握し、自動的に注意喚起する技術
555	建設現場で、AI を用いて作業進捗状況を常時把握・分析し、適切に工程管理、自動的に工程を最適化・修正する技術
556	橋梁などのコンクリート構造物のユニット化による、現場での組み立ての自動化
* 557	測量・調査から設計・施工、監督・検査、維持管理にわたる建設生産プロセス全体での(時系列を含めた)4D データの自動蓄積および統合的活用を可能とするインフラデータプラットフォームの構築
558	BIM データに基づいて、設計～施工～出来形確認まで建築プロジェクト管理し、センサーやロボットにより維持管理する技術
* 559	3D プリンター化による部材の現場製作、ロボット・ドローンによる建材の自律運搬等、構造躯体および仕上・設備の未来型合理化施工法

\*本トピックはフィンランド側の回答者数が少なかった(2名)。

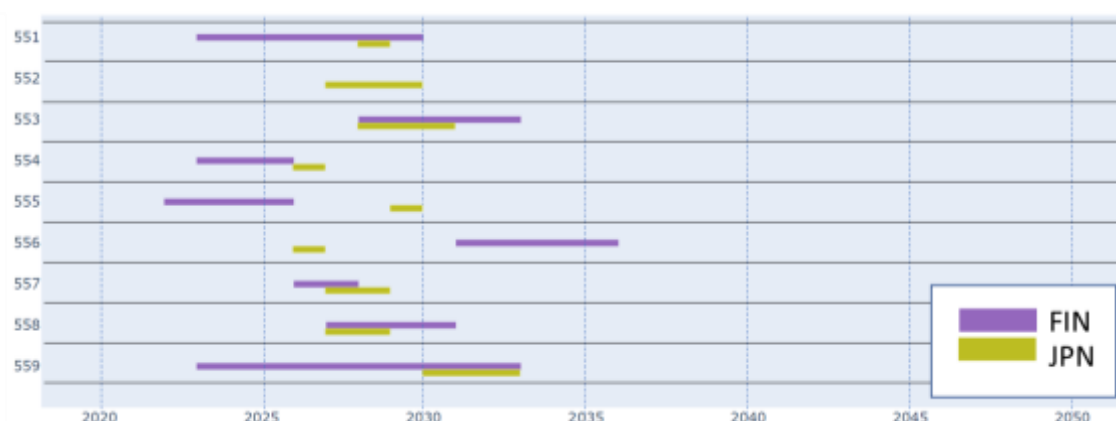
図表 24 重要度及び国際競争力比較



## 結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「3Dプリンター化による部材の現場製作、ロボット・ドローンによる建材の自律運搬等、構造躯体および仕上・設備の未来型合理化施工法」であった。しかし、低い競争力のため、この結果は確認しなければならない。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「設計・施工・過去の点検データに基づき、ロボット・センサーが自動的・自律的に点検・診断し、異常を発見・通知する技術」であった。

図表 25 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「3Dプリンター化による部材の現場製作、ロボット・ドローンによる建材の自律運搬等、構造躯体および仕上・設備の未来型合理化施工法」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2023	2033
日本	2030	2033

- フィンランドで早期実現すると予想された、他の代表的トピックは、「建設現場で、AIを用いて作業進捗状況を常時把握・分析し、適切に工程管理、自動的に工程を最適化・修正する技術」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2022	2026
日本	2029	2030

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「橋梁などのコンクリート構造物のユニット化による、現場での組み立ての自動化」であった。

	科学技術的実現時期	社会的実現時期
フィンランド	2031	2036
日本	2026	2027

## ヒアリング結果と考察

日本では2035年までにすべてのトピックが実現すると予測されていた。これらのトピックの方向性は明確であり、明確なR&D資金、国内のコラボレーション、人材とビジネス環境の改善、これらすべてが早期実現のサポートであろう。日本では大型建造物のためのロボティックスのようなトピックが、フィンランドでより早く実現されると予想された。これは、日本の大型建造物に対するニーズによる可能性もある。

フィンランドでは、これらの技術に関する多数のR&D&Iパイロットが進行中であるが、大規模な商業化は進んでいない。技術実現・実装に関する回答者の評価は正しいと言える。フィンランドの回答者は、技術実装には長い時間がかかると考えているようである。この見解の背後にある潜在的な要因の1つは、フィンランドの建設生産システムの下請けチェーンが長く複雑であり、実装プロセスを妨げている可能性があることである。これはまた、新興技術が広く実装される前に、その価値を明確に示す必要があることも意味する。

フィンランドの技術レベルは多くの分野で非常に高いが、これは、建設部門のビジネスロジックのローカルな性質による。一部のフィンランド企業は、この分野で世界クラスの業績を上げている。その一例が、世界的なエレベーターおよびエスカレーター会社のKoneである。

フィンランドにおけるロボット活用と建設生産システムにおけるセンサー利用については、あまりに楽観的である。しかし、プロジェクト管理ソフトウェアの活用と発展は、フィンランドの強い分野でもある。デジタルな計画管理データが、インフラ建設プロセスの正確なモニタリングのために使われることもある。将来的には、建設プロセスの最適化と建物のライフサイクル・メンテナンスのため、建設プロセスは、ますますビル情報モデル(BIM)に基づいて実施されることだろう。



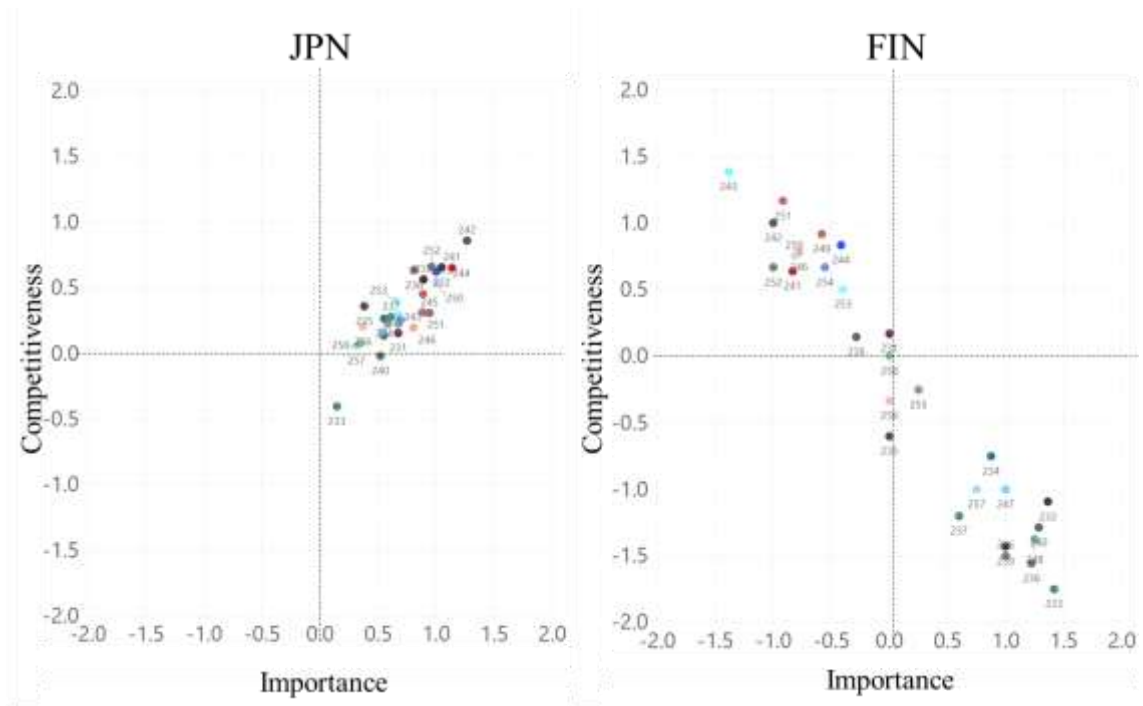
#### 4.3. 環境・資源・エネルギー

##### a. 資源開発・リデュース・リユース・リサイクル(3R)

図表 26 トピックスリスト

ID	トピック
231	ICT、人工衛星などを有効活用した効率的な鉱山探査技術
232	海洋鉱物資源の採取に必要な採鉱、揚鉱技術
233	環境汚染のないシェールガス採掘技術
234	チタンを現在の 50%以下のコストで製錬する技術
235	銅鉱山におけるヒ素処理保存技術
236	メタンハイドレート採掘利用技術
237	海水中から経済的にウランなどの稀少金属を回収する技術
238	温度 250℃、圧力 500 気圧以上の条件下の資源開発技術
239	熱水鉱床からの深海底金属資源の経済的採取技術
240	空気中から効果的にヘリウムを回収する技術
241	レアメタル品位の低い特殊鋼などの使用済製品からも有用金属を経済的に分離、回収する技術
242	小型電子機器類、廃棄物・下水汚泥焼却飛灰からレアメタルを合理的に回収・利用する技術
243	各種の基礎工業品生産が可能となるバイオマスリファイナリー形成
244	廃棄物の選別・分別システムをより向上させるための選別センサー技術
245	高レベル放射性廃棄物中の放射性核種を加速器の使用により核変換して、廃棄物量を激減させる技術
246	資源開発における地層解釈、埋蔵量評価、開発計画策定等へのデジタル利用技術
247	バイオ・ナノ技術を使った新規 EOR/EGR(石油・天然ガス増進回収)技術
248	資源開発に伴う誘発地震の原因・実態解明
249	リユースを促進するための機能を維持する革新的解体・設計技術
250	金属系の高度リサイクルを促進するための高度物理的分離濃縮技術
251	情報技術を活用した収集運搬など資源循環に関わるサプライチェーンの飛躍的効率化技術
252	半数以上の焼却炉で実現する、廃棄物焼却から発生する蒸気を工場や発電へ利用する技術
253	物質フローの共通データベース化による資源・有害物質の管理
254	AIを活用した廃棄物処理・リサイクル施設のメンテナンス自己診断を含む自動運転
255	超臨界地熱も視野に入れた地熱資源利用のための高温坑内機器
256	深度 5000m 程度に存在する超臨界水を利用した地熱発電技術
257	枯渇を示す地熱貯留層に対する人工涵養技術
258	地下水流動モデルに基づく地中熱ポテンシャルマップの全国展開

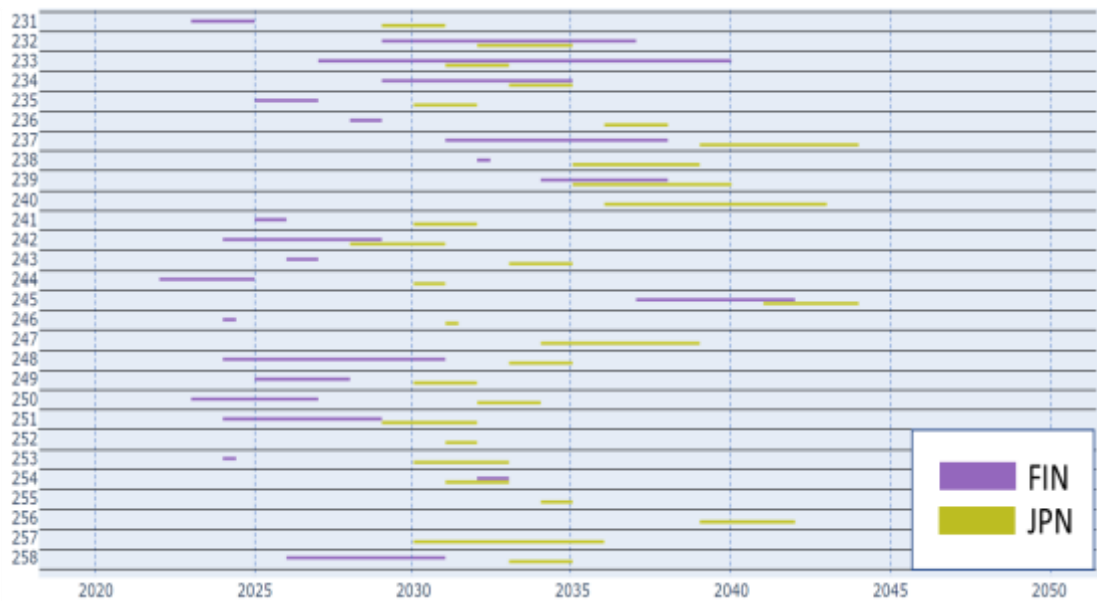
図表 27 重要度及び国際競争力比較



#### 結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「環境汚染のないシェールガス採掘技術」であった。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「小型電子機器類、廃棄物・下水汚泥焼却飛灰からレアメタルを合理的に回収・利用する技術」であった。

図表 28 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「廃棄物の選別・分別システムをより向上させるための選別センサー技術」である。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2022	2025
日本	2030	2031

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「AIを活用した廃棄物処理・リサイクル施設のメンテナンス自己診断を含む自動運転」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2032	2033
日本	2031	2033

## ヒアリング結果と考察

資源開発に関する技術では、情報技術やデジタル技術を活用したもの（探査、評価等）と、海洋資源開発（メタンハイドレート、熱水鉱床等）について、重要度が高いと評価されている。ただし、前者は比較的早期に実現すると期待されているが、後者については実現までにまだ20年くらいを要すると推測されている。一方で、海水や大気中から資源を回収する技術や超大深度からの地熱開発に関しては、期待度は低くないものの、実現可能性が低いと評価されている。また、環境に配慮したシェールガス開発技術は重要度、国際競

争力ともに極めて低いとの評価を得た。従って今後は、ITの利用や海洋資源の開発が加速される一方で、陸上での資源開発は慎重に進められていくものと考えられる。

3Rに関する技術では、含有濃度の低い廃棄物等からもレアメタルを回収することのできる技術の重要度が高く評価された。続いて、リサイクル材料の質を高めるための高度物理的分離濃縮技術及び、廃棄物焼却炉で製造した蒸気を工場等で利用する技術が重要度の高い技術として評価された。これらは科学技術的にも社会的にも2030年代前半までには実現が見込まれているなど、材料利用とエネルギー利用の両面から、資源循環を高度化する具体的な対策が期待を集めている。また、リユースを推進するための部品としての機能を維持した革新的な解体技術や、情報技術を活用したサプライチェーンの飛躍的効率化技術にも関心が集まった。今回はリデュースを明示的に扱うトピックが選択肢に含まれなかったが、シェアリングエコノミー等による脱物質化の推進も重要であると考えられる。

フィンランドについては、廃棄物管理技術をもつ一部のフィンランドの先駆者的企業は、異なるゴミ流通を取り扱うために、先進のセンサー技術、ロボティクス/オートメーション、分別プロセスをすでに使用している。この関連トピックのほとんどが、フィンランドにおいてより早期に実現されると予想された。一部、AIに関連したトピックは日本が比較的早期に実現されると予想された。これは日本のAI研究の重要性によると考えられるが、全体的にはフィンランドと比較して大きな違いはない。

本細目の技術は、資源探査にかなり集中する。これはおそらく日本では非常に重要な領域であるが、フィンランドでは同レベルの重要性にはならなかった。フィンランドには、国内の産業ドメインのサイズとタイプを考慮すると、豊富な資源がある。したがって、自国の資源探査を最適化する必要性はほとんどなかったと考えられる。

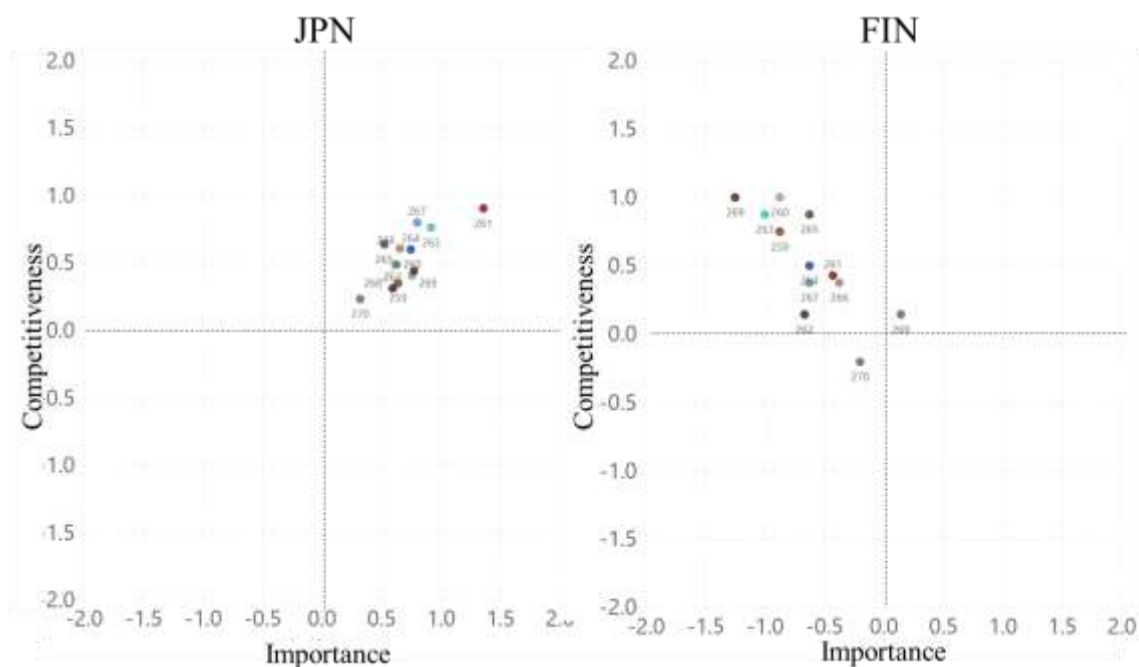
フィンランドでは、サーキュラーエコノミーに関連する資源開発技術の重要性は確実に高まり続けており、分類・再利用の技術はすでに確立されている。有害物質の管理に関するフィンランドのノウハウも発展し続けている。地熱発電に関連する技術については、フィンランドは地質学に関する強力な専門知識がある。

b. 水

図表 29 トピックスリスト

ID	トピック
259	衛星観測と地上観測の効果的な統融合により、全国の地下水マップの一般化
260	水環境質の非接触型連続センシングによる水域同時連続モニタリング技術
261	線状降水帯・ゲリラ豪雨による都市洪水、高潮、地盤沈下等の人口密集地における統合的水管理技術
262	雪を資源として有効利用するための気候・降雪モデルや観測に基づく、水資源及びエネルギー最適化技術
263	上水供給における有害微量化学物質、病原微生物等の連続モニタリング技術
264	下水処理水に残存する抗生物質の迅速な分析評価と除去技術
265	加圧エネルギーを 50%以上低減した逆浸透膜による浄水技術
266	経済的にリサイクル可能な逆浸透膜による浄水技術
267	途上国で一般利用できる循環型汚染水処理技術
268	BOD、COD、T-N 等に代替して水環境の質を評価できる統合水質指標の確立
269	水圏マイクロプラスチックの迅速分析手法の確立と健康リスク評価
270	大気から水資源を得る、ジオエンジニアリング(環境化学技術)やバイオメテック技術

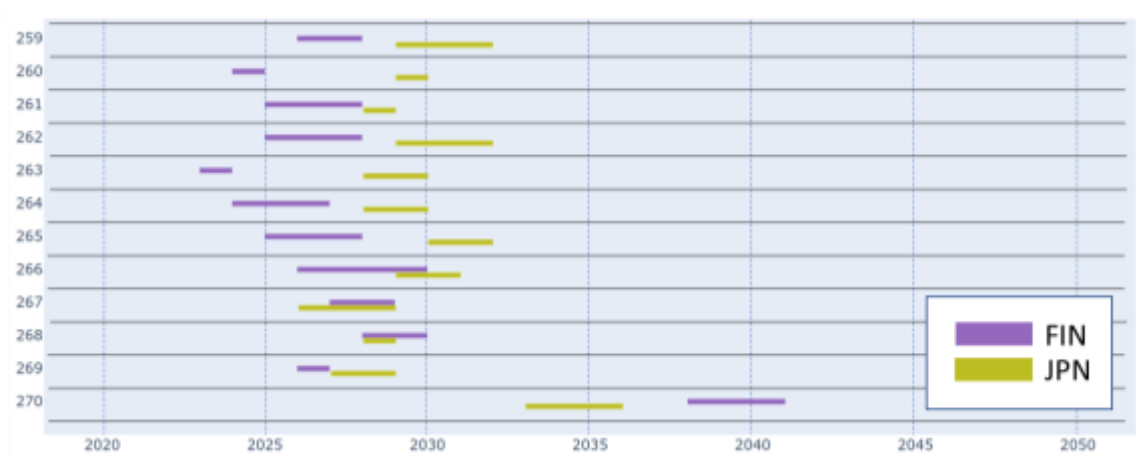
図表 30 重要度及び国際競争力比較



結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「BOD、COD、T-N等に代替して水環境の質を評価できる統合水質指標の確立」である。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「線状降水帯・ゲリラ豪雨による都市洪水、高潮、地盤沈下等の人口密集地における統合的水管理技術」であった。

図表 31 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「上水供給における有害微量化学物質、病原微生物等の連続モニタリング技術」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2023	2024
日本	2028	2030

ヒアリング結果と考察

水は、今世紀以降、エネルギー資源、食糧資源と同様に、重要な資源の一つである。世界人口の増加基調の中、一人当たりの水資源の資料量の増加が見込まれる一方で、気候変動等に伴い、資源の賦存量や地域性等に変化が生じることが懸念される。本細目では、水資源の観測・モニタリングに係るトピック、水資源及びエネルギーの最適化に係るトピック、経済的に利用可能な浄水技術・汚染水処理技術、水圏の環境影響評価等で構成される。これらの科学技術の進展により、水需要が拡大し、水ストレスにさらされる地域の拡大防止に寄与することが期待される。

日本では、アンケート結果では、「線状降水帯・ゲリラ豪雨による都市洪水、高潮、地盤沈下等の人口密集地における統合的水管理技術」が、重要度、国際競争力とも高く評価された（国際競争力では、「途上国で一般利用できる循環型汚染水処理技術」、「上水供給における有害微量化学物質、病原微生物等の連続モニタリング技術」等のトピックの評価も高い）。社会的実現時期は本細目のトピックの多くが 2026 年から 2030 年までに実現する。

フィンランドについては、フィンランドには高度な水浄化技術およびシステムが整っている。地方自治体の水システムも非常に高度である。しかし、フィンランドで国際的に競争力のあるビジネスを構築するのに生かされていない状況にある。またフィンランドでは、都市の給水システムのデジタル監視も非常に進んでおり、豊富で純粋な地下水を保有する。

全体として、本細目についてフィンランドは日本よりも早期に実現することが期待された。水の浄化に関するトピックは、日本では比較的早い時期に実現することが期待された。これは「国土利用・保全」に関する結果と一致している。

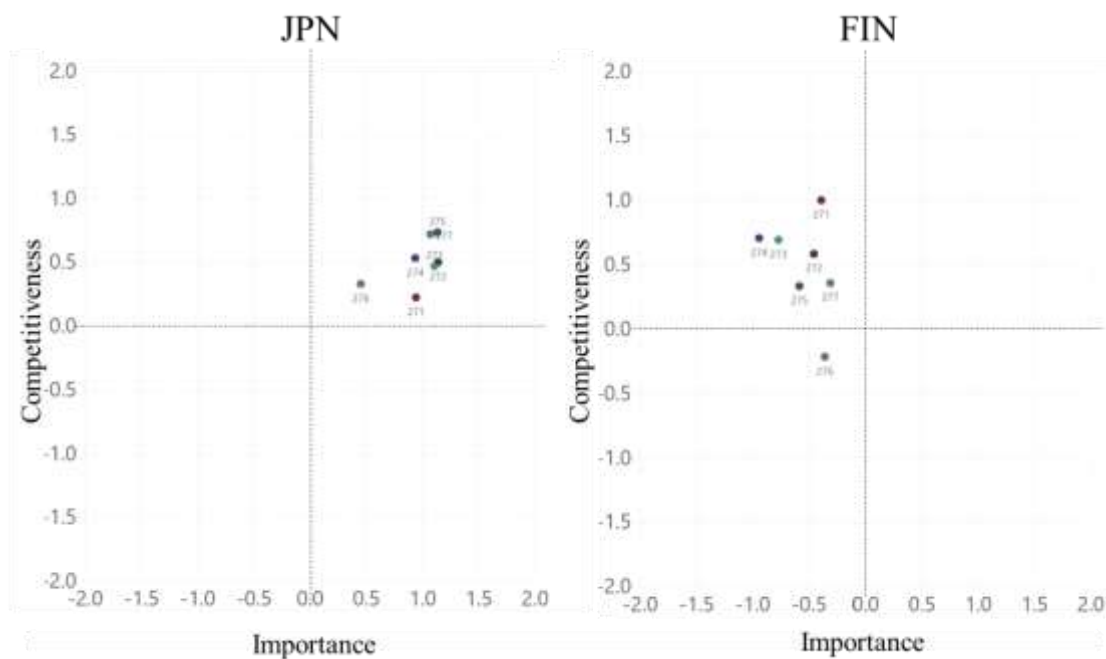
水に関連するほとんどの技術は、フィンランドでは問題ではない。ただし、267(途上国で一般利用できる循環型汚染水処理技術)、および269(水圏マイクロプラスチックの迅速分析手法の確立と健康リスク評価)の技術は重要となると見込まれ、特にフィンランドに関連する可能性がある。

c. 地球温暖化

図表 32 トピックスリスト

ID	トピック
271	化石燃料を使用しない航空機
272	海水酸性化による生物多様性、とりわけ漁業資源への影響の解明
273	気候変動による食料生産への地域ごと、品目ごとの影響予測技術
274	CO2 濃度分布等の観測データをもとにして、各国の CO2 排出量を評価するシステム
275	気候感度(大気中 CO2 濃度が倍増して十分に時間がたったときの世界平均地表面気温上昇量)の推定精度の 3℃から 1℃への向上
276	グリーンランド氷床融解の不安定化が起こる臨界温度(ティッピングポイント)の推定精度の 1℃以下への向上
277	高解像度大気循環モデルと海洋大循環モデルおよび社会活動に伴う物質・エネルギー循環をデータ同化によって考慮した地球環境予測モデルに基づく、100 年にわたる長期地球環境変動予測

図表 33 重要度及び国際競争力比較



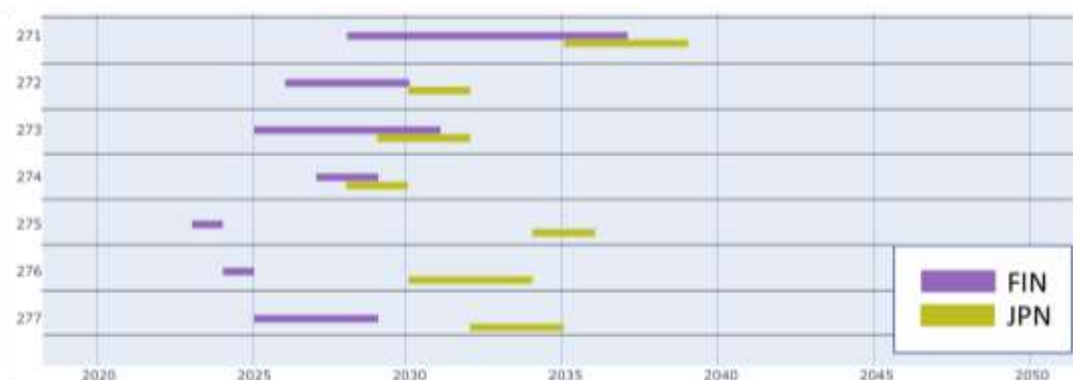
結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「高解像度大気循環モデルと海洋大循環モデルおよび社会活動に伴う物質・エネルギー循環をデータ同化によって考慮した地球環境予測モデルに基づく、100年にわたる長期地球環境変動予測」であった。



- 日本で最も重要度の高いトピックは、「海水酸性化による生物多様性、とりわけ漁業資源への影響の解明」であった。

図表 34 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「気候感度(大気中CO2濃度が倍増して十分に時間がたったときの世界平均地表面気温上昇量)の推定精度の3℃から1℃への向上」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2023	2024
日本	2034	2036

## ヒアリング結果と考察

フィンランドにおいては、カーボンニュートラル・フィンランドの創設に強い政策的支援があった。世界的な気候難問を解決することを目的とする産業の輸出ソリューションも著名である。フィンランド政府は、2035年までにカーボン中立をゴールに掲げている。全トピックについて、フィンランドで早期に実現されることになっていた。この違いは、推定に関連したトピックで特に顕著となる。

また、フィンランドのエネルギー企業「ネステ」は世界的にも有名であり、フィンランドはサステナブル航空燃料において競争力が高い。

両国共に、本細目における科学技術のレベルは高い。これは、両国が持つ強力な技術的・科学的専門知識を考慮すれば当然のことである。地球温暖化の予測と評価の分野では、シミュレーション技術は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)に従い、重要なテーマとなる。近年生成されるデータ量は、モデルの解像度と実験の増加の結果として指数関数的に増加し、現在これらのデータの配布・処理が困難になっている。日本がこの分野で貢献し続けるためには、スーパーコンピュータとともにデータインフラストラクチャの開発に投資することが不可欠であろう。同時に、オープンデータインフラの普及と観測データの国際的な共有も研究開発を加速させることが期待される。

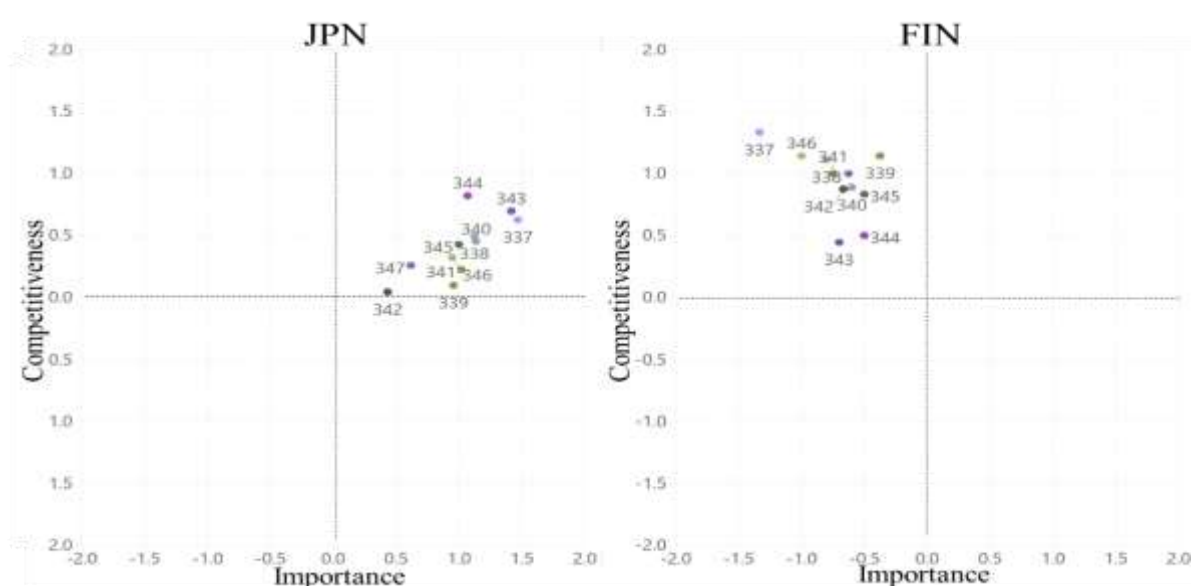
#### 4.4. ICT・アナリティクス・サービス

##### a. ネットワーク・インフラ

図表 35 トピックスリスト

ID	トピック
337	大容量、超信頼・超低遅延、超多数端末通信の複数を同時に実現する有無線移動通信技術
338	転送データ量あたりの消費電力を飛躍的に削減する通信ネットワーク・通信ノード技術
339	クラウドデータセンタにおける通信大容量化やアーキテクチャの進化可能性を実現するデータプレーン技術
340	高密度多重化による大容量通信、端末の動きを予測・追従し、選択的に大容量通信、端末間通信を実現する移動通信技術
341	クラウド・エッジ・端末が連携し、分散した計算資源とストレージ資源、通信資源が有機的に結合した、最適に利用可能な通信基盤技術
342	情報や機能を名前により指定し、網内で情報処理を実施する情報指向・コンテンツ指向ネットワーク
343	平時にはネットワークの輻輳緩和や耐故障性向上に資し、災害時には緊急通信を優先的にサービス可能、あるいは、スラッチから迅速に構築可能な、柔軟な情報通信技術
344	マルチコアファイバ・シリコンフォトニクスなどの、革新的に大容量かつ高密度収容可能な光通信技術
345	量子暗号を利用した革新的にセキュアな量子通信
346	性能・柔軟性・堅牢性を兼ね備えるソフトウェア化されたネットワーク機器の構成技術
347	エンド・ツー・エンドでアプリケーションやサービスを非干渉に収容するスライス技術

図表 36 重要度及び国際競争力比較



## 結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「クラウドデータセンタにおける通信大容量化やアーキテクチャの進化可能性を実現するデータプレーン技術」であった。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「大容量、超信頼・超低遅延、超多数端末通信の複数を同時に実現する有無線移動通信技術」であった。

図表 37 実現年予想の比較



- 多くのトピックが日本で早期に実現されることが期待されている。
- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは「エンド・ツー・エンドでアプリケーションやサービスを非干渉に収容するスライス技術」であった。

	科学技術的実現時期	社会的実現時期
フィンランド	2025	2027
日本	2028	2029

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「大容量、超信頼・超低遅延、超多数端末通信の複数を同時に実現する有無線移動通信技術」であった。

	科学技術的実現時期	社会的実現時期
フィンランド	2033	2033
日本	2027	2028

## ヒアリング結果と考察

情報通信基盤はあらゆる社会経済活動で生成されるデータを流通させるための最重要インフラである。現在、第五世代移動通信(5G)に代表されるように、有線・無線その統合技術が、帯域・低遅延・接続数などの観点で革新的な進化を遂げつつあり、世界中で次世代情報通信への更なる進化を求めて研究開発が進められている。近年、都市部でのインフラ整備だけではなく地域におけるデジタルデバイド(地域デバイド)を緩和するため地域の情報通信基盤整備が推進されている。一般に、社会情勢に大きなインパクトを与える技術として、各国における周波数割当・規制緩和・法制度整備、および、世界で共通して使える技術として国際標準化などが急ピッチで進められている。このような背景を踏まえ、将来の情報通信基盤の在り方を議論し更なる発展を考える上で重要な論点を整理する目的で、本細目が設定されている。

日本のアンケート調査結果によると、他の細目と比べて当細目は、重要度および国際競争力が概して高いと言える。トピックレベルで見ると、「大容量、超信頼・超低遅延、超多数端末通信の複数を同時に実現する有無線移動通信技術」および「平時にはネットワークの輻輳緩和や耐故障性向上に資し、災害時には緊急通信を優先的にサービス可能、あるいは、スクラッチから迅速に構築可能な、柔軟な情報通信技術」が重要度および国際競争力において、本分野全体の中でもトップ10に入っている。また、「マルチコアファイバ・シリコンフォトニクスなどの、革新的に大容量かつ高密度収容可能な光通信技術」は国際競争力において本分野全体の中で最上位となっている。

フィンランドの回答者は、関係する技術がすでに現在利用可能であるものも含めて、2030 年までにはほとんどの技術が実現、利用可能になることを期待している。したがって、次世代技術の実現はまだまだ先であるが、フィンランドの人々の前世代技術の経験を踏まえると、次世代技術の社会実装はスムーズであるはずである。特定の技術の相互関係は、他の技術の実現にも影響を与える可能性がある。たとえば、トピック 338 の実現が遅いという結果は、トピック 337 と関連がある可能性がある。日本では、比較的早期にトピックが実現すると予想される一方、「量子暗号を用いた革新的で安全な量子通信」は非常に重要であると考えられているが技術的実現は 2033 年で、他のトピックよりも遅れると予想されたことから、長期的な戦略が必要である。

全体として、このテーマのトピックは、日本では比較的早い時期に実現されると予想された。一方でフィンランドでは高レベルのネットワークインフラがあり、これは国際競争力にも反映されている。フィンランドは手ごろな価格の4Gおよび5Gテクノロジーを利用するのに良い立場にあり、この分野の能力は非常に高いと考えられている。また、フィンランドでは、クラウドテクノロジーはビジネスや政府でも広く使用されている。

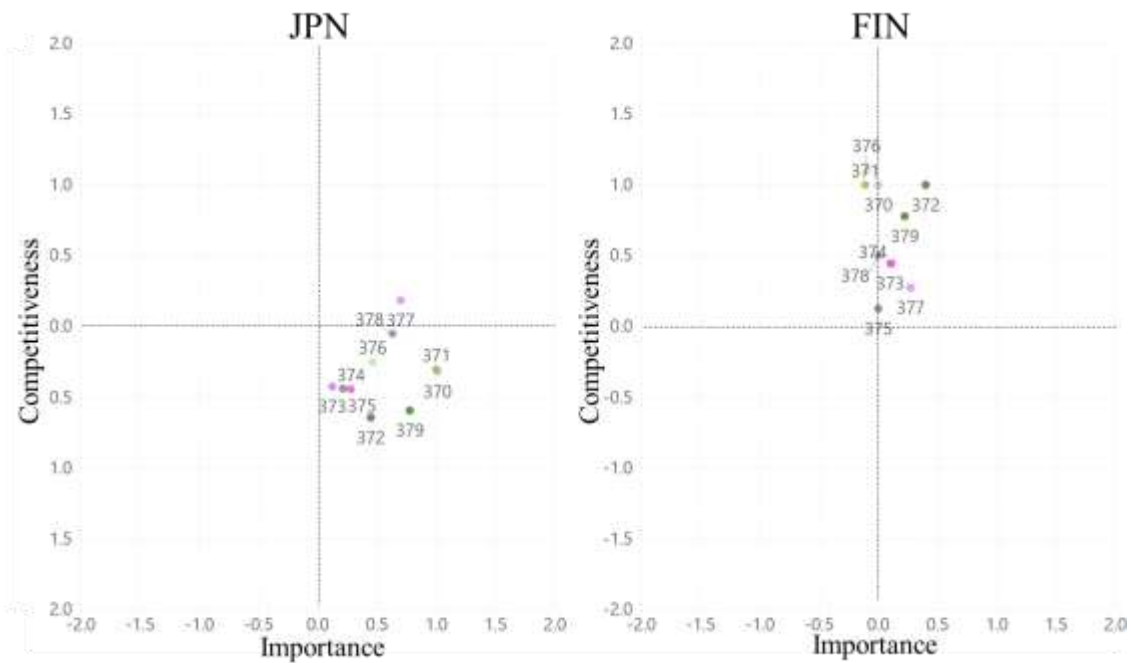
フィンランドにおいて、本細目のトピックの重要度が低いことは、一見奇妙に思えるかもしれない。考えられる可能性としては、フィンランドの回答者は、現在のフィンランドの競争力は高いと感じている一方で、この技術の重要性は、新しい技術が進化するにつれ低下すると評価した可能性がある。別の可能性としては、回答者が、ネットワークインフラとサーキュラーエコノミーの関連を必ずしも見出さなかった可能性もある。

b. 産業・ビジネス・経営応用

図表 38 トピックスリスト

ID	トピック
370	顧客数や知的財産の重要度が高まり、企業価値を評価する際に、無形資産の評価割合が平均的に企業価値の 70%に達する
371	知的財産の扱いが明確化され、新規事業全体のうちオープンイノベーションによる新製品・サービスの割合が 30%を超える
372	クラウドソーシングやジョブマッチングのプラットフォームが普及し、労働人口の 30%以上が企業等の雇用労働者ではなくフリーランスとして働くようになる
373	移動、レジャー、食事、衣服など幅広い分野でシェアリングエコノミーとサービス化が進展し、一般生活者の消費支出のうち購買が占める割合は 10%以下となる
374	一般生活者が日常生活で行う決済の総額の 30%以上を、中央銀行がコントロールせずブロックチェーン技術で管理される仮想通貨で行うようになる
375	コミュニティや個人間で電力の融通・取引を行う、ブロックチェーン技術等を活用したエネルギーシステム
376	AI が普及し、大半の業務を自動化することができるようになることで、現役世代の約 30%が働かない社会となる
377	マス・カスタマイゼーションが自動車、衣服、レジャー用品など幅広い分野で普及し、既製品を購入するよりも自分のニーズに合ったものを個別に発注して購入する形態が主流となる
378	ネット販売と配送サービスが普及することにより、実店舗での購入は全消費額の 10%以下となる
379	あらゆるビジネスが少数の世界的なプラットフォームの上で提供されるようになり、販売、決済、仕入、マーケティング、販売分析等の業務がほぼ全てそれらのプラットフォームの上で行われるようになる

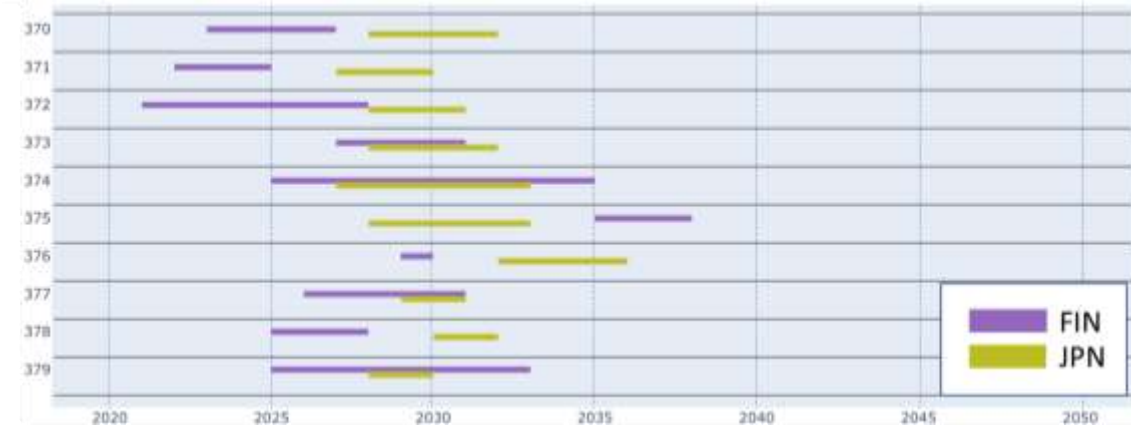
図表 39 重要度及び国際競争力比較



結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「クラウドソーシングやジョブマッチングのプラットフォームが普及し、労働人口の30%以上が企業等の雇用労働者ではなくフリーランスとして働くようになる」であった。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「顧客数や知的財産の重要度が高まり、企業価値を評価する際に、無形資産の評価割合が平均的に企業価値の70%に達する」であった

図表 40 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「知的財産の扱いが明確化され、新規事業全体のうちオープンイノベーションによる新製品・サービスの割合が30%を超える」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2022	2025
日本	2027	2030

## ヒアリング結果と考察

科学技術的实现と社会的实现の間には比較的長い遅れがある。この分野では、技術の社会実装においては、法律やその他の非技術的側面を考慮することが特に重要である。

フィンランドにおいて、学界、産業、公共部門の間の共同創造的なオープンイノベーションは、フィンランドの伝統的な強みである。オープンコラボレーションという強力なカルチャーがあり、イノベーションポリシーとしてビジネスエコシステムの開発をサポートしている。実現年予測において、ブロックチェーンのトピックのみが日本でフィンランドよりも比較的早期に実現すると予想されていたが、大きな違いはなかった。

この細目におけるフィンランドの高いレベルの競争力には、さまざまな事象が関与している。たとえば、フィンランドではデジタル化が非常に急速に進んでおり、多くの企業がすでにプラットフォームエコノミーで活動している。またフィンランドには、オープンイノベーションと、学界、産業界、公共部門の間での共創という長い伝統がある。フィンランドのイノベーションポリシーは、ビジネスエコシステムの開発もサポートしている。フィンランドと日本は非常に類似した人口統計プロファイルを持っており、AIの早期導入の重要な推進力となるであろう。

日本において、本細目は、他のICT分野の細目と比較して全体として国際競争力が低いとの評価が見られた。とりわけ、プラットフォームを活用した働き方や商取引の実践、またブロックチェーン技術を用いた仮想通貨の利用や、コミュニティでの電力融通などにおいて、国際競争力の低さが顕著であった。その一方で、重要度については項目によってばらつきが見られた。プラットフォーム上での商取引については極めて重要と評価される一方、シェアリング・エコノミーの実践や、電力融通、仮想通貨の利用においては重要度が低く評価された。本細目では技術がもたらす社会像を客観的に記述し、評価に委ねることとしたため、それが望ましい社会であるかどうかについて、明確なコンセンサスが得られていない状況を反映している可能性がある。国際競争力に関する危機感は共有されているが、今後は、技術を実際に運用した際の社会的インパクトを考慮した上で、どのような社会を創っていくべきか、議論の深まりが必要であろう。



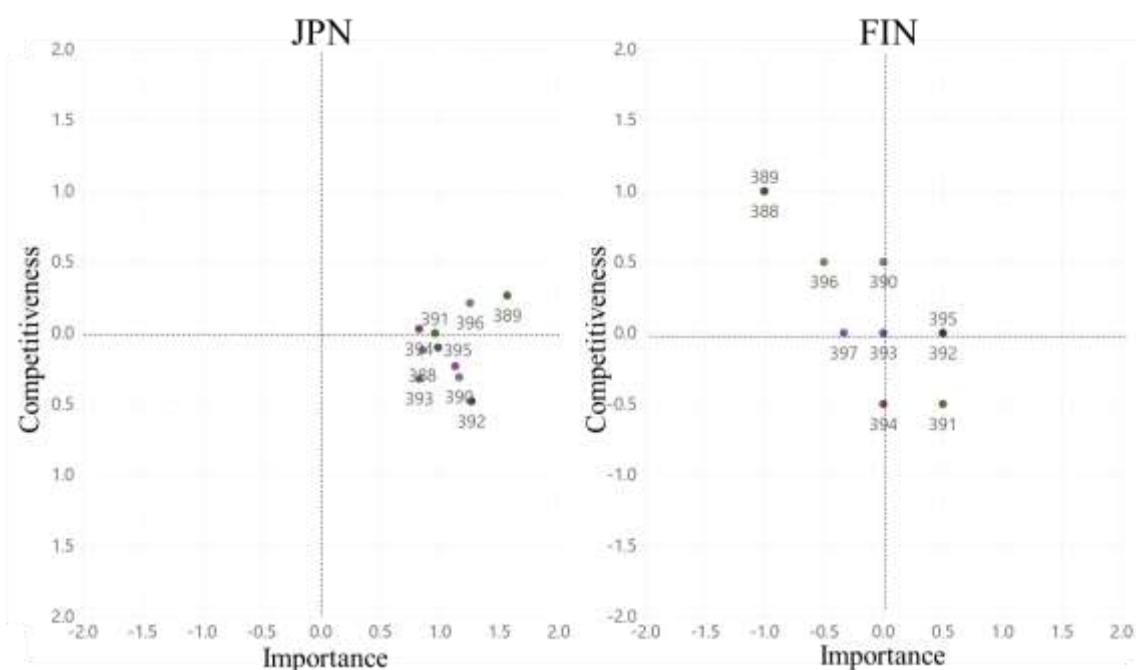
c. 社会実装

図表 41 トピックスリスト

ID	トピック
* 388	ブロックチェーン技術を用いた、出生から現在に至るまでの健康・医療・介護等情報の紐づけデータに基づく、健康維持システム(未病社会を実現)
* 389	農業の生産性、人手不足・担い手不足の解消を抜本的に改善するAI、IoT、ロボット等技術
* 390	行政サービスの100%デジタル化、行政保有データの100%オープン化による、役所での申請手続等を最小化できるプッシュ型行政の実現
* 391	キャッシュレス化による支払・決済の省力化、消費者購買履歴データの蓄積・活用の推進による新たなサービス創出の基盤構築
* 392	出社不要・複業を前提とした自由度の高い就業形態による高生産性社会への移行
* 393	教育に AI・ブロックチェーンが導入され、学校法人の枠を超えた学習スタイルが構築され、生涯スキルアップ社会の実現
* 394	マイナンバーとの連携によるデジタル技術を活用した災害情報伝達と生活再建手続の円滑化の実現
* 395	外国人受け入れを背景とした、翻訳技術の向上による、外国人の受け入れ環境の充実化
* 396	地域における公共交通網の維持や、物流分野の変革を実現する、自動走行、ドローンなど多様な移動手段、およびそれらの管理・運用支援技術
* 397	すべての国民が IT リテラシーを身につけることによる、誰もがデジタル化の便益を享受できるインクルーシブな社会の実現と IT 人材不足の解消

\*本トピックはフィンランド側の回答者数が少なかった(2名)。

図表 42 重要度及び国際競争力比較

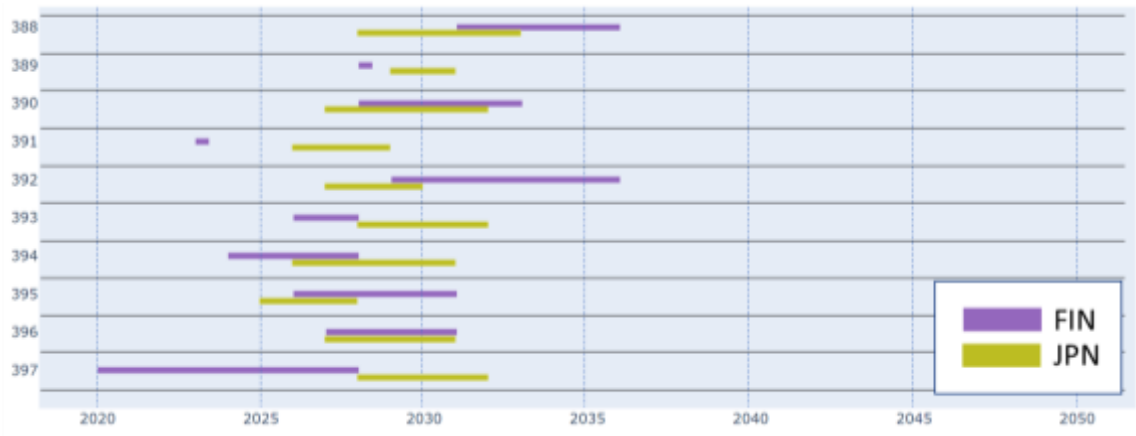




結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「外国人受け入れを背景とした、翻訳技術の向上による、外国人の受け入れ環境の充実化」であった。しかし、回答者数が2名であったために、結果は参考である。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「農業の生産性、人手不足・担い手不足の解消を抜本的に改善するAI、IoT、ロボット等技術」であった。

図表 43 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「ブロックチェーン技術を用いた、出生から現在に至るまでの健康・医療・介護等情報の紐づけデータに基づく、健康維持システム(未病社会を実現)」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2023	2023
日本	2026	2029

- 日本で早期実現すると予想された代表的トピックは、「外国人受け入れを背景とした、翻訳技術の向上による、外国人の受け入れ環境の充実化」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2026	2031
日本	2025	2028

## ヒアリング結果と考察

特にフィンランドの実現時期の結果は、科学技術的実現、社会的実現共に大きな差がある。また、本細目のトピックは、一貫した考察は難しい程極めて多様であるが、日本において外国人を受け入れることのトピックが早期に実現予測された理由としては、日本ではこの問題が緊急な案件であると推定される。フィンランドのグラフは非常に分散しており、また、回答数が少なかったことで明白な解釈は困難である。たとえば、フィンランドは何十年も大規模デジタル化プロジェクトに投資しており、顧客データをビジネスに使用してカード社会へと変化させた先駆者である。他方、フィンランドは農業でロボティクス、オートメーションとデジタル化の実装においては比較的遅れている。

これは、フィンランドのエンジニアリング文化がテクノロジーに集中し、社会性を考慮していなかったといえる。そして、日本はフィンランドよりもテクノロジーの社会的適用性に対して意識が強かった。労働力不足は、今後 20 年にわたるフィンランド社会の大きな挑戦の 1 つであるだろう。

日本のアンケートの結果から、社会実装項目は「重要度」は高いが「国際競争力」は低いという回答が多い傾向が顕著に見られた。それこそが最大の課題であると言えよう。また、他分野との比較においては、科学科学技術的実現と社会的実現の見通し時期のタイムラグが大きい傾向があることも特徴と言える。その理由として科学技術の実現に向け「法規制整備」及び「倫理的・法的・社会的課題」への必要性が高い領域としてICT・アナリティクス・サービス分野が多くを占めることから、規制・倫理的課題が大きく響いている可能性に関する考察が議論においてはあった。しかし、アンケート回答者の多くが学術機関関係者である点には留意が必要である。社会実装スピードの加速が今後の課題であるが故に、産業界の声を踏まえてのその原因の解明は重要であると考えられる。

#### 4.5. マテリアル・デバイス・プロセス

##### a. 応用デバイス・システム(インフラ・モビリティ分野)

図表 44 トピックスリスト

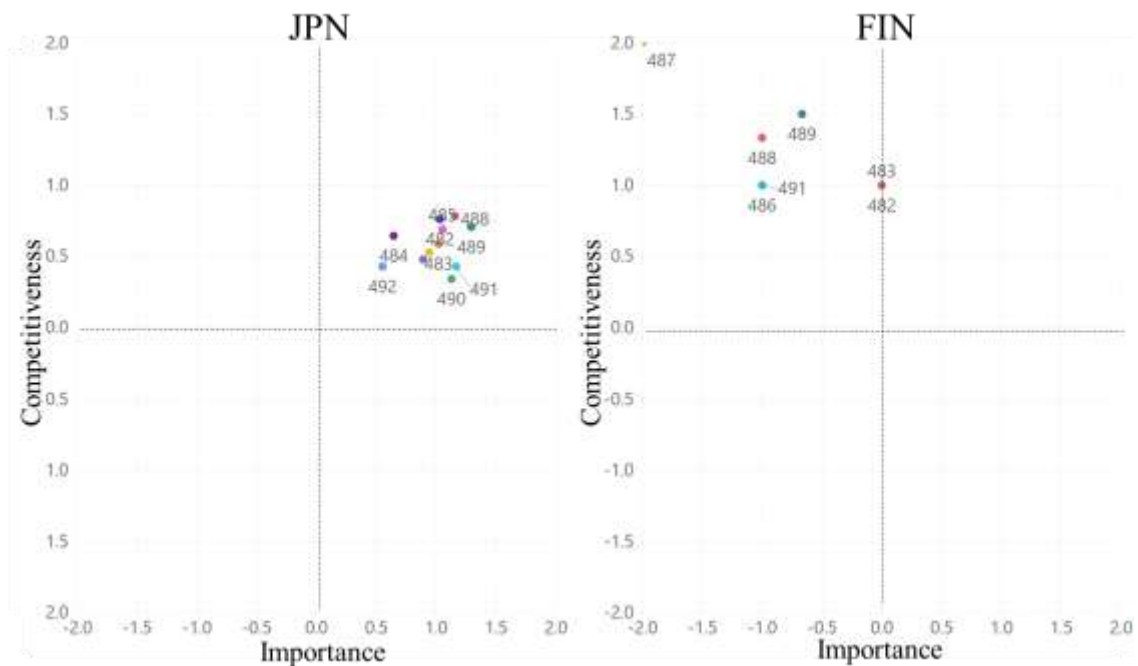
ID	トピック
* 482	鉄と非金属材料(木材、コンクリート、CFRP 等)の高機能ハイブリッド構造材料(構造性能、意匠性、耐食性等)
* 483	経年劣化・損傷に対する自己修復機能を有し、ビル等の建築構造物の機能を維持できる構造材料
** 484	超高層ビル等大型建築物向けの、大入熱溶接が可能となる建築用高強度鋼材(780MPa 板厚 100mm を一度に溶接できる建築構造材料)
** 485	燃料電池車向けに、水素貯蔵密度 100kg/m <sup>3</sup> 以上かつ質量貯蔵密度 10wt% 以上の高密度水素キャリア
486	任意形状のインフラ補修部材を安価で製造できる3Dプリンター素材
** 487	熟練工不足に対応した人の技量によらない、簡便な構造材料用接合・接着技術
488	海洋大気環境下でも構造物の 50 年超の超長寿命を実現できる防食技術(塗膜を含む)
*** 489	インフラ構造物の内部の劣化状況をリアルタイムに診断する技術
** 490	少子高齢化に伴う労働力の不足の際に必要な、エネルギー供給(燃料・ガス)やゴミ回収といったインフラを自動運転で行うモビリティシステム
* 491	インフラを経済的に維持できなくなる過疎地で必要となる、従来の中央集約型上下水道インフラを自律分散型にするシステム
** 492	重量物を積載したトラックの走行に対して耐えうる構造を有する、100km/h で走行する乗用車に対し 20kW 以上の非接触給電を可能とするシステム

\*本トピックはフィンランド側の回答者数が少なかった(2名)。

\*\*本トピックはフィンランド側の回答者数が特に少なかった(1名)。

\*\*\*本トピックはフィンランド側の回答が得られなかった。

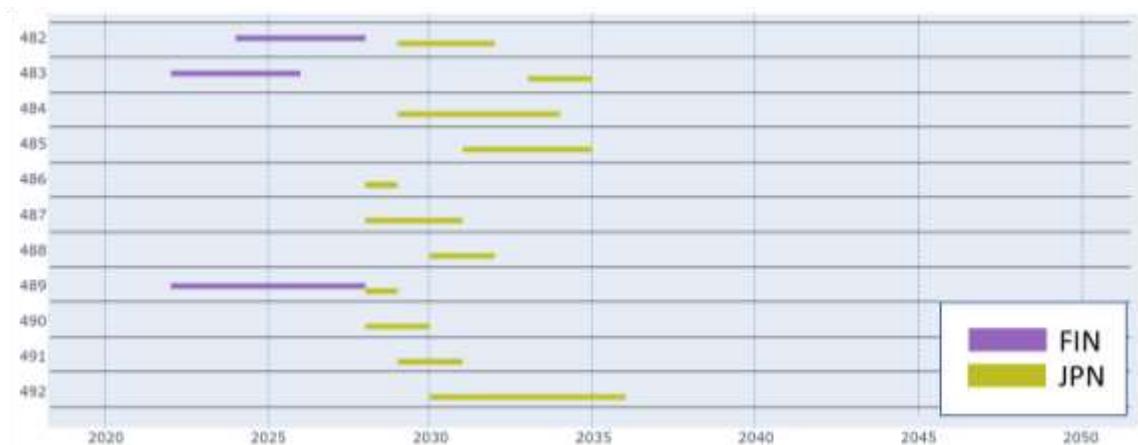
図表 45 重要度及び国際競争力比較



#### 結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いピックは、「経年劣化・損傷に対する自己修復機能を有し、ビル等の建築構造物の機能を維持できる構造材料」であった。しかし、回答者数は2名のため、この結果は参考である。
- 日本で最も重要度の高いピックは、「インフラを経済的に維持できなくなる過疎地で必要となる、従来の中央集約型上下水道インフラを自律分散型にするシステム」であった。

図表 46 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的ピックは、「経年劣化・損傷に対する自己修

復機能を有し、ビル等の建築構造物の機能を維持できる構造材料」であった。しかし回答者数が2名のため、この結果は参考である。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2022	2026
日本	2033	2035

## ヒアリング結果と考察

フィンランドは材料開発分野が強い。特にフィンランドが高い競争力を示すものとしては、金属、プラスチック、生体適合材料である。また材料コーティングも研究が推進されている。この領域は、将来のフィンランドの主要分野である。

日本は他の先進国に比べて高齢化・人口減少が急速に進んでおり、世界に先駆けてそれらの課題に対応する新技術を創り出すことが期待される。インフラ分野に関わる材料は量的需要が大きいことから、新興国での人口爆発を鑑みて、リサイクルや高耐久性に関する研究に焦点を当てて材料資源の課題へ、再生可能エネルギーの活用に関わる技術に焦点を当ててエネルギー資源の課題へ、それぞれ対応している。自動運転や自動診断システムについて細目を設けており、人口オナーナスへ対応している。いずれの技術も確立されれば、世界的な普及が見込まれ、日本基幹産業の強化につながると期待される。

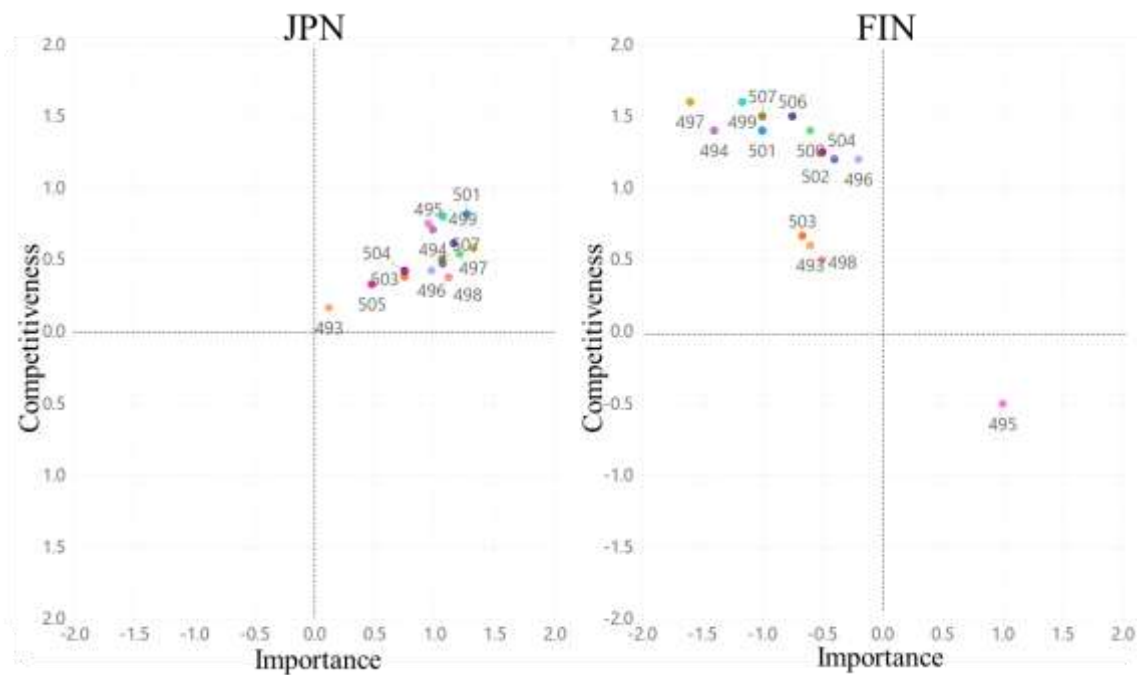
日本の結果によると、インフラ・モビリティ分野のトピックスはおしなべて重要度・国際競争力がともに高いと評価された。特に重要度が高いと評価されたトピックスはインフラ構造物の内部劣化状況をリアルタイムに診断する技術である。自動診断技術の発展と今後の少子化に伴う人手不足を念頭に重要度が評価されたものと思われる。

b. 応用デバイス・システム(ライフ・バイオ分野)

図表 47 トピックスリスト

ID	トピック
493	人工肉など人工食材をベースに、食品をオーダーメイドで製造(造形)する 3Dフードプリンティング技術
494	食品の安全をその場で確認できる超小型化学分析システム
495	人と同じソフトな動きと感触を可能にするためのロボット向けの機能をもつソフトマテリアル
496	人の感覚について、喪失した場合には補い、さらには超人的レベルを達成するよう補強するバイオミメティクス材料
497	体内情報(薬物動態、癌マーカー、感染、その他血液成分)をモニタリングするウェアラブルデバイス
498	生体エネルギーで半永久的に動き続ける体内埋め込み健康管理(検査・診断・治療)デバイス
499	バイオミメティクスに基づく表面や構造を有し、耐久性、安全性が飛躍的に向上する生体適合材料
500	移植用臓器を長期間保存できるバイオマテリアルおよびプロセス技術
501	生体外で生体組織を培養するシステムおよびバイオマテリアル
502	3D プリンティング技術を用いた再生組織・臓器の製造(バイオフィabrication)
503	細胞や細胞内のタンパク質、アミノ酸、イオン等の動態を、マイクロ秒以下の時間分解能で追尾可能なモニタリング技術
504	タンパク質の一次配列構造から三次元立体構造を予測する技術
505	量子もつれ光による超高精度測定を利用した新規な生命現象、生化学現象の解明
506	全てバイオデグラダブル(生分解性)マテリアルで構成されたデバイスや日用品の実用化技術(例えば、環境中、生体中に放置できるもの)
507	CO <sub>2</sub> 固定化や廃棄物の再資源化プロセスを実現する、生分解性材料あるいは生化学的機能を有する材料

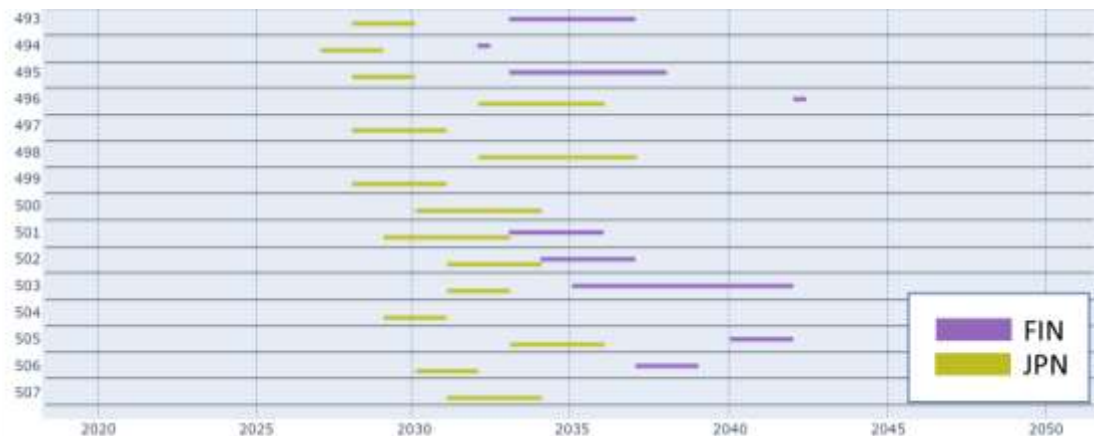
図表 48 重要度及び国際競争力比較



### 結果概要

- フィンランドで最も重要度の高いトピックは、「人と同じソフトな動きと感触を可能にするためのロボット向けの機能をもつソフトマテリアル」であった。
- 日本で最も重要度の高いトピックは、「体内情報(薬物動態、癌マーカー、感染、その他血液成分)をモニタリングするウェアラブルデバイス」であった。

図表 49 実現年予想の比較



- フィンランドで早期実現すると予想された代表的トピックは、「食品の安全をその場で確認できる超小型化学分析システム」であった。

	科学技術的实现時期	社会的实现時期
フィンランド	2032	2032
日本	2027	2029

## ヒアリング結果と考察

本細目のトピックは、日本で早期に実現されると予想された。これは、材料科学が日本の強みである可能性がある。興味深い点は、フィンランドの競争力が日本より高い評価であっても、フィンランドよりも早く社会適用されると思っているようである。量子テクノロジーは、バイオテクノロジー分野の研究者にとっては遠い存在であるようである。日本では、量子センサーの実現が2030年代に始まると予測された。

本細目のトピックスは、フィンランドにおいて優先される研究テーマではなかった。フィンランドの焦点は、主に慢性疾患とそれに関連する費用問題の解決にある。これらの挑戦に取り組む際に使用される主要なツールは、異なるデータによるアプローチを含み、ここでの対象ではなかった。このことは、フィンランドにおける重要度が低くなった要因である可能性もある。一方でフィンランドの回答者は、フィンランドの競争力が比較的高いとした。

日本では、体内情報をモニタリングするウェアラブルデバイス、埋込型健康管理デバイス、生体組織や移植臓器の長期保存を実現する技術について重要度が高い。さらに生体適合材料や生体外で使うマテリアルについては国際競争力が高いと判定されている。2020年代末から2030年代初期に科学技術的实现に達するという予測になっているが、人を含めた生体そのものを扱うテーマについて国際競争力が低いという結果である。研究開発費の拡充、研究環境基盤の整備だけでなく、国際連携や標準化の法整備や ELSI への対応が重要と認識されていることが本分野の特徴といえる。技術的優位性が確立されれば、社会、産業ともに発展が見えているテーマであるが、法整備や ELSI に対する対応の遅れが、研究開発自体、ひいては、研究者の人材育成の遅れにも影響しないような対策が求められる。近年の海洋プラスチックや国際的なゴミの廃棄に関わる問題の顕在化もあり、バイオデグラダブル(生分解性)マテリアルによるデバイスや日用品の実用化技術に対する重要度も高いとみられた。



## 5. おわりに

### ● 方法論について

デルファイ法は、最初は専門家間の匿名でのコンセンサスを構築するために設計された。この目的においてデルファイ法は非常に効果的であり、それは今回のプロジェクトでも変わらない。ただし、二国間でのフォーサイトにおいてデルファイ法を実施する際は、考慮すべき重要事項もいくつか明らかになった。

[1] デルファイ法は非常に研究者に負担をかける可能性があるため、調査トピックは慎重に選定する必要がある。

[2] デルファイ法はコンセンサスを目的としているが、フォーサイトの目的によっては、シナリオに価値がある場合がある。

[3] デルファイ法を他のフォーサイトの手法と組み合わせて補完する必要がある。

### ● 共同プロジェクトについて

デルファイ調査の結果は、日本とフィンランドを比較する上で優れた基礎資料となった。フィンランドの観点からは、複数の手法と組み合わせた上で継続することが重要であり、これによりフィンランドでデルファイ法の認知度が高まり、より多くの回答者を引き込むことができる。さらに、フィンランドの環境に合わせて質問をローカライズすることも有益である。また、フィンランドの専門家は、アンケートによる科学技術の評価という手法そのものについては高く評価した。

ただし、本プロジェクトの目的は、両国間でデルファイ調査を主としたフォーサイトの方法論を共有し、同方法で調査した結果を比較することで、日本とフィンランドにおいて重要な将来のイノベーションに資する科学技術を特定することである。これについては回答数の問題もあり、今回のデルファイ調査だけではこの目的を十分に達成できなかったため、プロジェクトは当初予定を広げ、専門家ヒアリングも含んだ形となった。

今後は、具体的なロードマップを作成するために、いくつかの領域をより詳細に分析する必要がある。また、サーキュラーエコノミーの達成においては、高度な科学技術、ビジネスモデルやイノベーションを両国で共有し、その結果を両国で有効に活用できれば、実現は更に現実的なものとなる。

### ● 今後に向けて

共同デルファイ調査は、サーキュラーエコノミーに関連した日本とフィンランドの見解の理解を深めるのに役立った。結果は非常に興味深く、結果それ自体にも価値がある。ただし、本プロジェクトの結果は、両国の共通のビジョンやロードマップの作成に使用される必要がある。このような将来的な成果を見据えた共同研究を続けることが必要である。現在、日本とフィンランドは、新たな共同研究に向けて検討中である。

日本とフィンランドはどちらも科学技術において非常に先進国である。また、国としても国際的にも、同様の課題に直面している。例えば両国の地理的位置、天然資源、人口密度等の課題は、時を経るごとに科学技術政策に大きな影響を及ぼす考えられる。一方で日本とフィンランドは、技術ノ

ウハウの点では異なる強みを持っている。これらの違いは、たとえば、水と防災技術の重要性と国の競争力にも表れている。

両国が共有する課題は主に環境問題に関連しているが、食料やその他のトピックも急速に重要性を増しており、この傾向はCOVID-19パンデミックによってさらに加速している。今後、市民の幸福を確保するために不可欠である倫理的および法的考慮事項も考慮する必要がある。

#### ● 日本への示唆

フィンランドでは回答数の問題から追加的なヒアリングが実施され、有用な情報が得られた。これは日本での今後の調査に当たっても示唆的である。2019年に実施した第11回調査では全体として5352名から回答を得たが、各トピックの回答者数については、トピックによって28～522名まで大きな差が見られ、一定程度以上の回答数を確保することの困難な領域が存在することが推測された。また、繰り返しによる収れんも弱かった。回答者数を得にくい領域や回答者の意見が分かれる領域などについて、追加的なヒアリング等は将来的な選択肢となり得ると考えられる。また、今後実施予定のシナリオ作成についても、コンセンサスを目的としたデルファイと複数のケースを描くシナリオといった両手法の特徴をどう生かすかなど、多くの示唆を得られると考えられる。

## 参考文献

1. FORESIGHT FOR OUR CIRCULAR ECONOMY SOCIETY -COOPERATIVE PROJECT BETWEEN BUSINESS FINLAND AND NISTEP-  
<https://www.businessfinland.fi/49e9fd/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/biocircular-finland/foresight-for-our-circular-economy-society.pdf> (2020 年 11 月 1 日アクセス)
2. S&T Foresight 2019 - Summary report, Science and Technology Foresight Center, NISTEP, MEXT.  
<http://doi.org/10.15108/nr183>
3. LANTTO, R. (Ed.), JÄRNEFELT, V. (Ed.), & TÄHTINEN, M. (2018). Going beyond a circular economy. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Visions.  
[https://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2018/Going\\_beyond\\_a\\_circular\\_economy.pdf](https://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2018/Going_beyond_a_circular_economy.pdf)
4. OMOE, Hiromi, GAMO, Hidenori, KOSHIBA, Hitoshi, Close-up science and technology areas for the future - An attempt to extract by combination of AI-related technology and expert judges, NISTEP, MEXT.  
<http://doi.org/10.15108/dp172>
5. Foresight for Our Future Society -Cooperative project between NISTEP (Japan) and Tekes (Finland).  
<http://hdl.handle.net/11035/715>
6. SUOMINEN, Arho and SEPPÄNEN Marko. “Bibliometric data and actual development in technology life cycles: flaws in assumptions.” Foresight (2014).
7. SUOMINEN, Arho, TUOMINEN Aulis and KANTOLA Jussi. “Analyzing prospects of portable fuel cells with an expert opinion study.” Futures 43, no. 5 (2011): 513-524.
8. SUOMINEN, Arho, TUOMINEN Aulis and KANTOLA Jussi. “Scenarios in technology and research policy: Case portable fuel cells.” International Journal of Strategic Change Management 3, no. 1-2 (2011): 32-50.

調査資料-300

将来のサーキュラーエコノミー社会のためのフォーサイト ～日本ーフィンランド共同プロジェクト～

2020 年 11 月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所  
科学技術予測センター  
浦島邦子, 黒木優太郎

〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館 東館 16 階  
TEL: 03-3581-0605 FAX: 03-3503-3996

Foresight for our circular economy society  
-cooperative project between Business Finland and NISTEP-

November 2020

URASHIMA Kuniko, KUROGI Yutaro  
Science and Technology Foresight Center  
National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)  
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan



<https://www.nistep.go.jp>