

2023 年度（2023M-169）

多目的型地下インフラモデルの調査研究

報 告 書
【 概 要 版 】

2024 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター



競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。

<https://jka-cycle.jp>

この報告書は「概要版」です。

「概要版」および「本編第 I 部～第IV部」はエンジニアリング協会ホームページよりダウンロードできます。

以下のアドレスまたは QR コードから、当協会の JKA 補助事業調査研究報告書のページにアクセスして、2023 年度補助事業をクリックして下さい。

<https://www.ena.or.jp/information/jka-subsidy-business>



序

本報告書は、公益財団法人 JKA より機械振興補助事業の補助を受け、一般財団法人 エンジニアリング協会地下開発利用研究センターが実施した 2023 年度「多目的型地下インフラモデルの調査研究」の成果を報告書として取りまとめたものです。

エネルギー・食料の安定供給確保、激甚化する自然災害への対応、国際関係の不安定さから生じる他国からの脅威や地政学的リスクの回避といった社会経済的課題に直面する我が国において、産業界はこれらの課題に即応する戦略が求められています。

こうした産業界のニーズを受けて、地下開発利用研究センターでは、少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少や国内需要の減少、それに伴う経済規模の縮小といった社会情勢にも目を向けながら、社会インフラの課題解決に向けて幅広く産・学・官の英知を集めて調査研究を実施しています。社会的諸問題の解決や将来の望ましい社会システムの構築等に資するために、これまでの新技術・各種システムに関する調査研究成果の蓄積も踏まえながら、2023 年度は、「多目的型地下インフラモデルの提言」を目指して調査研究を行いました。

これからの地下インフラは、地上に比べ安定した環境で運用することができる地下空間の特性を活かし、建設技術だけでなく急速に普及する AI を含めた情報化技術を基盤に、生活基盤としてのエネルギーシステム、災害時の避難・備蓄システム、人流・物流システム等の多様なシステムや技術を組み込んだ多目的で多機能な施設であることが求められます。

本調査研究の実施にあたっては、地下開発利用研究センターの研究企画委員会の下で、「地下利用推進部会」の中に「生活基盤等の安全保障に資する地下インフラの運用に関する調査研究」、「備蓄と避難に対応するシェルターとしての地下インフラに関する調査研究」、「人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築に関する調査研究」および「地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究」をそれぞれ担当する 4 つの専門部会を設けて調査研究を行い、報告書を取りまとめました。

最後に、本報告書の成果がこれからの時代における地下インフラの再構築の検討に活用されることを切望しますとともに、この事業にご協力いただいた関係各位に対して心から謝意を表します。

2024 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会
理事長 石倭 行人

2023年度 地下利用推進部会
全体テーマ 「多目的型地下インフラモデルの調査研究」

幹事会名簿

幹事長 (第1部会)	西森 昭博 部会長)	(株)大林組	土木本部 生産技術本部 シールド技術部 上級主席技師
副幹事長 (第2部会)	大森 剛志 部会長)	東電設計(株)	ジオフロント本部 バックエンド技術部 地盤技術グループマネージャー
幹事 (第1部会)	菅沼 優巳 副部会長)	(株)竹中土木	技術・生産本部 i-Con 部長
幹事 (第2部会)	土屋 光弘 副部会長)	西松建設(株)	土木事業本部 土木設計部 設計1課 課長
幹事 (第3部会)	笠 博義 部会長)	(株)安藤・間	技術研究所 シニアリサーチャー
幹事 (第3部会)	河田 浩史 副部会長)	三井住友建設(株)	土木本部 土木営業部 課長
幹事 (第4部会)	栗山 裕司 部会長)	鹿島建設(株)	土木設計本部 地盤基礎設計部 設計部長
幹事 (第4部会)	本多 伸 副部会長)	(株)アサノ大成基礎エンジニアリング	事業推進本部 担当部長
事務局	塩崎 功	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 副所長 兼技術開発部長
事務局	竹内 伸光	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 担当部長 (2023年8月まで)
事務局	澤井 康	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 担当部長 (2023年9月から)
事務局	武井 孝	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹
事務局	下山 みを	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 主任研究員

生活基盤等の安全保障に資する地下インフラの運用に関する調査研究部会
(第1部会)

委員名簿

部会長	西森 昭博	(株)大林組	土木本部 生産技術本部 シールド技術部 上級主席技師
副部会長	菅沼 優巳	(株)竹中土木	技術・生産本部 i-Con 部長
委員	西村 毅	(株)安藤・間	技術研究所 構造・材料研究部 コンクリート構造グループ 主席研究員 (2023年12月まで)
委員	窪島 光志	川崎地質(株)	企画・技術本部 (北日本支社駐在) 設計統括室 サブリーダー
委員	高山 秀樹	中央開発(株)	東京支社 技術部 担当部長
委員	花田 光司	東急建設(株)	土木事業本部 技術統轄部 土木設計部 プロジェクト設計グループ
委員	向井 孝徳	飛島建設(株)	本社 企画本部 イノベーション推進部 課長
事務局	下山 みを	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 主任研究員

備蓄と避難に対応するシェルターとしての地下インフラに関する調査研究部会
(第2部会)

委員名簿

部会長	大森 剛志	東電設計(株)	ジオフロント本部 バックエンド技術部 地盤技術グループマネージャー
副部長	土屋 光弘	西松建設(株)	土木事業本部 土木設計部 設計1課 課長
委員	黒澤 英樹	応用地質(株)	流域・砂防事業部 深部地質・水資源部 専任職
委員	丸山 祐司	川崎地質(株)	関東支社 技術部 技術2グループ グループマネージャー
委員	吉丸 哲司	基礎地盤コンサルタンツ(株)	技術本部 地盤岩盤解析室 副室長
委員	大西 満	佐藤工業(株)	技術センター 生産推進部 担当部長 兼土木生産推進課長 (2023年12月まで)
委員	中田 範俊	佐藤工業(株)	土木事業本部 技術推進部 部長 (2024年1月から)
委員	岩竹 要	大日本ダイヤコンサルタント(株)	地圏環境事業部 地圏環境部 地盤水理室 主任
委員	村瀬 澄江	(株)竹中工務店	レジリエンスソリューション推進室 シニアチーフエンジニア
委員	中村 征史	鉄建建設(株)	建設技術総合センター 研究開発センター 主幹研究員
委員	栗田 裕敏	日揮(株)	エンジニアリング本部 シビルエンジニアリング部 部長
事務局	下山 みを	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 主任研究員

人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築に関する調査研究部会
(第3部会)

委員名簿

部会長	笠 博義	(株)安藤・間	技術研究所 シニアリサーチャー
副部会長	河田 浩史	三井住友建設(株)	土木本部 土木営業部 課長
委員	三石 晋	応用地質(株)	D X推進本部 地下埋設物探査プロジェクト室 専任職
委員	高萩 啓生	(株)技研製作所	工法事業部 部長
委員	渡辺 慎太郎	基礎地盤コンサルタンツ(株)	設計本部 海外設計部 課長
委員	市原 和彦	佐藤工業(株)	土木事業本部 営業推進部 部長
委員	西家 翔	(株)竹中工務店	技術研究所 地盤・基礎2グループ
委員	上田 正人	中央開発(株)	事業本部 顧問
委員	堂園 浩一	鉄建建設(株)	土木本部 エンジニアリング企画部 担当部長
委員	平野 孝行	西松建設(株)	土木事業本部 土木設計部 シニアマイスター
事務局	武井 孝	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹

地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究部会
(第4部会)

委員名簿

部会長	栗山 裕司	鹿島建設(株)	土木設計本部 地盤基礎設計部 設計部長
副部会長	本多 伸弘	(株)アサノ大成基礎エンジニアリング	事業推進本部 担当部長
委員	岩崎 広幸	(株)安藤・間	建設本部 土木技術第一部
委員	田中 義浩	応用地質(株)	エネルギー事業部 事業企画部 専任職
委員	浜田 元	(株)奥村組	技術本部 技術研究所 土木研究グループ 地盤調査・計測チームリーダー
委員	村下 富雄	(株)鴻池組	土木事業総轄本部 技術本部 土木技術部 技術2課 課長
委員	福田 毅	清水建設(株)	土木総本部 土木技術本部 地下空間 統括部 トンネル設計グループ 主査
委員	田中 宏典	戸田建設(株)	本社 技術研究所 社会基盤構築部 主管
事務局	武井 孝	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹

多目的型地下インフラモデルの調査研究

報告書

【概要版】

目次

序

2023年度地下利用推進部会 幹事会 各部会委員名簿

1. はじめに	1
1.1 部会活動の基本目的	1
1.2 部会の構成と調査研究内容	2
1.2.1 幹事会の活動	2
1.2.2 各部会の活動	3
2. 生活基盤等の安全保障に資する地下インフラの運用に関する調査研究	7
2.1 調査経緯・調査方法	7
2.1.1 調査方針	7
2.1.2 調査内容	7
2.1.3 見学・調査状況	7
2.2 調査研究のまとめ	10
2.2.1 エネルギー安全保障の現状と課題	10
2.2.2 熱利用技術の現状と課題	12
2.2.3 発電技術の現状と課題	14
2.2.4 エネルギー貯蔵技術の現状と課題	17
2.2.5 核エネルギー利用技術の現状と課題	19
2.2.6 世界の地下都市	22
2.3 調査研究のまとめ	25
2.3.1 調査研究のまとめ	25
2.3.2 今後の課題	25
3. 備蓄と避難に対応するシェルターとしての地下インフラに関する調査研究	27
3.1 調査経緯・調査内容	27
3.1.1 調査方針	27
3.1.2 調査内容	27
3.1.3 調査状況	28
3.2 調査研究のまとめ	29
3.2.1 武力攻撃による被害想定	29
3.2.2 シェルターに関する調査	31

3.2.3 既存地下インフラのシェルターとしての利用可能性調査	35
3.3 今後の課題	38
4. 人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築に関する調査研究	42
4.1 調査経緯・調査方法	42
4.1.1 調査方針	42
4.1.2 調査内容	42
4.1.3 調査状況	42
4.2 調査研究のまとめ	45
4.2.1 自然環境（気候変動）変化	45
4.2.2 人口および人口動態の変化	46
4.2.3 国土インフラの変化	48
4.2.4 技術革新	50
4.2.5 人流の変化	53
4.2.6 物流の変化	55
4.3 今後の課題	60
5. 地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究	62
5.1 調査経緯・調査方法	62
5.1.1 調査方針・概要	62
5.1.2 関連施設への現地調査・ヒアリング調査	62
5.2 地下インフラモジュールについて考える	66
5.2.1 地下インフラモジュールとは	66
5.2.2 多目的（用途）の要求性能	67
5.2.3 関連法規	69
5.2.4 課題	71
5.3 多目的地下インフラの構築・再構築技術	75
5.3.1 構造例	75
5.3.2 構築・再構築技術例	78
5.4 今後の課題	81

1. はじめに

1.1 部会活動の基本目的

エネルギーの安定供給や食料の安定調達などの社会経済的な安全保障、激甚化する自然災害、国際関係の不安定さから生じる他国からの脅威や地政学リスクの発生といった社会的課題は、その範囲も多岐にわたり、今後も新たなリスクの発生が懸念される。

また、生産年齢人口や国内需要の減少、それに伴う経済規模の縮小といった社会環境の変化は、産業や市民の活動を支える社会インフラに対しても少なからず影響を与えると考えられる。

一方、2030年までに持続可能でよりよい世界を目指すSDGs(持続可能な開発目標)は、今やすべての国家、産業における共通目標であり、今後はクリーンなエネルギー(目標⑦)、産業と技術革新の基盤(⑨)、住み続けられるまちづくり(⑩)、気候変動対策(⑬)といった観点からの社会インフラ形成が求められる。

地下利用推進部会は、一般財団法人エンジニアリング協会地下開発利用研究センターの事業の一環として、以下の5項目を活動の基本目的として自主事業を行っている。

- ・新しい地下利用の形態やニーズを探索する。
- ・参加企業の技術ポテンシャルの向上を図る。
- ・調査研究活動により、参加企業間の一層の活性化を図る。
- ・地下開発利用の積極的な普及を図る。
- ・地下利用に関する技術開発テーマ、政策テーマの発掘と提案に努める。

この基本的な目的に沿って、本年度から2年間にわたり、全体テーマ「多目的型地下インフラモデルの調査研究」を掲げ、様々な社会的課題を抱える我が国の都市域において、多目的な地下空間の利用を前提とした社会インフラを追求し、既存のインフラを再構築していくことを目指す。

初年度となる2023年度は、国民、地域住民の安全・安心を保障しながら、同時に人流、物流を中心に経済を円滑に循環させるという、方向の異なる要求を同時に満たす地下インフラとはどのようなものかを想定し、その構築・再構築はどのように行うかについて基本的な調査研究を行った。

1.2 部会の構成と調査研究内容

地下利用推進部会の活動推進にあたっては、全体テーマ「多目的型地下インフラモデルの調査研究」の中で、次の4つの調査研究対象をサブテーマとして設定し、それぞれ調査部会（第1部会～第4部会）を立ち上げた。

① 経済等の安全保障を目途とした地下インフラの運用

（生活基盤等の安全保障※）に資する地下インフラの運用に関する調査研究部会：第1部会）

※この調査研究事業において、安全保障は、エネルギー安全保障、重要物資（食糧、医薬品）の安定調達、防災（自然災害、生物学的災害、地政学的リスクの回避）等を指す。

② 多様なハザードを想定した備蓄と避難に対応する地下インフラの仕様

（備蓄と避難に対応するシェルターとしての地下インフラに関する調査研究部会：第2部会）

③ 将来の人流、物流の特性変化に対応する新たな地下インフラ構築、再構築の方向性

（人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築に関する調査研究部会：第3部会）

④ 地下インフラモジュールの基本構造と構築技術

（地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究部会：第4部会）

1.2.1 幹事会の活動

各部会活動を支え、全体テーマ実現に向けて活動を集約させるために、各部会の部会長および副部会長により幹事会を構成し、各部会の計画・実施・進捗状況に関する情報交換および部会共通の事項に関して連携し、調査研究を行った。

表 1.2.1-1 に示すとおり、2023年度は6回の幹事会を開催した。

表 1.2.1-1 幹事会の活動状況

回	開催日	主要議事
第1回	2023年 6月 27日	・幹事長、副幹事長の選任 ・2023年度の全体活動計画についての討議
第2回	2023年 8月 3日	・各部会の活動状況の共有 ・現地調査、ヒアリング先の候補抽出
第3回	2023年 9月 12日	・報告書の項目内容と目次（案）の検討 ・現地調査、ヒアリング先の調整
第4回	2023年 11月 30日	・報告書の項目調整と各部会の整合性確認 ・現地調査／ヒアリング実施結果報告
第5回	2024年 1月 8日	・報告書概要版の項目および日程調整 ・報告書本編の項目調整、フォーマット調整
第6回	2024年 2月 15日	・報告書概要版の原稿確認 ・報告書本編の項目確認と原稿校正

1.2.2 各部会の活動

(1) 生活基盤等の安全保障に資する地下インフラの運用に関する調査研究部会（第1部会）

1) 活動内容

生活基盤等の安全保障に資する地下インフラの運用について、特にエネルギー安全保障にフォーカスし国内外の現状把握と課題を整理した。

2) 活動状況

表 1.2.2-1 に示すとおり、2023 年度は 8 回の部会を開催した。また、2023 年 12 月 20 日～21 日の 2 日間にわたり現地調査・ヒアリングを実施した。

表 1.2.2-1 第1部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第1回	2023年6月19日	<ul style="list-style-type: none"> ・部会長、副部会長の選任 ・調査研究テーマおよび進め方について意見交換
第2回	2023年7月27日	<ul style="list-style-type: none"> ・各委員の情報収集結果の確認、集約 ・調査研究方針の決定 ・調査研究項目と担当の決定 ・現地調査・ヒアリング先の検討
第3回	2023年8月29日	<ul style="list-style-type: none"> ・各委員の情報収集結果の報告と意見交換 ・調査研究項目および報告書記載内容の調整 ・エネルギー関連施設の見学先の決定
第4回	2023年9月29日	<ul style="list-style-type: none"> ・各委員の情報収集結果の確認と意見交換 ・報告書原稿作成の進捗確認および内容調整 ・現地調査計画の確認 ・原稿執筆要領の確認
第5回	2023年10月24日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【各部会本編】原稿（第1稿）の確認
第6回	2023年12月8日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【各部会本編】原稿（第2稿） ・報告書作成スケジュールの確認 ・報告書原稿校正作業の分担決定 ・現地調査・ヒアリングの詳細確認
現地調査	2023年12月20日 2023年12月21日	<ul style="list-style-type: none"> ・産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（FREA）の現地調査、ヒアリング ・東京電力廃炉資料館、東京電力福島第1原子力発電所の現地調査
第7回	2024年1月15日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【各部会本編】原稿の確認、修正 ・現地調査の報告と取りまとめ
第8回	2024年2月20日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【概要版】の確認 ・報告書【各部会本編】原稿確認・校正

(2) 備蓄と避難に対応するシェルターとしての地下インフラに関する調査研究部会（第2部会）

1) 活動内容

多様なハザードを想定した備蓄と避難に対応する地下インフラの仕様について、特に避難施設としての機能にフォーカスし国内外の現状把握と課題を整理した。

2) 活動状況

表 1.2.2-2 に示すとおり、2023 年度は 7 回の部会を開催した。また、現地調査・ヒアリングとして、国内における核シェルターの普及活動に取り組んでいる「特定非営利活動法人日本核シェルター協会」を訪問し、スイス仕様にもとづく核シェルターの現地調査およびヒアリングを実施した。

表 1.2.2-2 第2部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第1回	2023年6月13日	<ul style="list-style-type: none"> ・部会長、副部会長の選任 ・調査研究テーマ、部会の進め方について意見交換
第2回	2023年7月20日	<ul style="list-style-type: none"> ・各委員の情報収集結果の確認、意見交換 ・現地調査・ヒアリング先についての検討
第3回	2023年8月22日	<ul style="list-style-type: none"> ・調査研究項目および報告書目次案の検討・決定 ・各委員の情報収集結果の確認、意見交換、ヒアリング先の決定
現地調査 ヒアリング	2023年10月5日	<ul style="list-style-type: none"> ・特定非営利活動法人 日本核シェルター協会の核シェルターモデルルーム現地調査およびヒアリングを実施
第4回	2023年11月13日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【各部会本編】原稿（第1稿）の確認、意見交換、調整 ・現地調査結果の報告、確認 ・報告書作成スケジュールの確認
第5回	2023年12月15日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【各部会本編】原稿（第2稿）の確認、意見交換、調整
第6回	2024年1月12日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【各部会本編】原稿（第2稿）の確認、修正 ・報告書【概要版】作成の調整
第7回	2024年2月14日	<ul style="list-style-type: none"> ・報告書【概要版】の確認 ・報告書【各部会本編】原稿の確認・校正

(3) 人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築に関する調査研究部会(第3部会)

1) 活動内容

将来の人流・物流の特性変化に対応する新たな地下インフラ構築および既設インフラの転用の可能性について調査を行う。

今年度は、研究の第一段階として、地球温暖化など人間の生活環境に大きな影響を与える自然環境の変化、人口や産業構造や生活スタイルの変化など基礎的な将来予測を行うと同時に、社会構造の変化にも大きな影響を与える技術革新の動向を調査する。具体的には、様々なデータに基づいて予測された未来社会の状況を、主に公的な機関による資料をもとに整理し、こうした検討結果を受けて、人の動きや交通体系の変化と、物流のシステムや量的な変化などを予測した。

2) 活動状況

表 1.2.2-3 に示すとおり、2023 年度は 8 回の部会を開催した。また、現地調査・ヒアリングとして、未来社会を支えるエネルギーのうち、CO₂削減に寄与する技術を調査する目的で、「IGCC パワー合同会社」と「なみえまち水素タウン構想の浪江町」を訪問し、現地調査およびヒアリングを実施した。

表 1.2.2-3 第3部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第1回	2023年6月14日	・部会長、副部会長の選任 ・2023年度の活動テーマについての討議
第2回	2023年7月24日	・部会の進め方について討議 ・現地視察先について検討
第3回	2023年8月31日	・調査研究内容検討 ・現地調査意見交換
第4回	2023年10月10日	・報告書の目次案と担当の調整 ・現地視察の調整について討議
第5回	2023年11月15日	・報告書の目次案と担当の調整 ・現地視察の調整について討議
現地調査 ヒアリング	2023年12月6日 ～12月7日	・IGCC パワー合同会社、なみえまち水素タウン 構想現地調査・ヒアリングを実施
第6回	2023年12月25日	・報告書執筆の進捗状況確認と内容協議 ・報告書の各委員執筆内容の確認
第7回	2024年1月19日	・報告書執筆の進捗状況確認と内容協議 ・報告書の各委員執筆内容の確認
第8回	2024年2月22日	・報告書の最終確認、校正

(4) 地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究部会(第4部会)

1) 活動内容

近年多くなってきた多目的型地下インフラモジュールを対象に、2023、2024年度の2か年で調査・研究を実施するものである。2023年度は「地下空間を経済的、効率的に利用するために多目的に人流、物流、備蓄、避難等に対応できる（大深度）地下インフラを構想する」ところまでを想定した。

2) 活動状況

表 1.2.2-4 に示すとおり、2023年度は7回の部会を開催した。また、大谷石採掘場跡地、首都圏外郭放水路、神戸三宮周辺街、寝屋川北部地下河川および阪神高速淀川左岸線（2期）工事の現地調査・ヒアリングを行い調査研究の深度化を行った。

表 1.2.2-4 第4部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第1回	2023年6月7日	・ 部会長、副部会長の選任 ・ 2023年度の活動テーマについての討議
第2回	2023年7月11日	・ 部会の進め方について討議 ・ 視察候補について検討
現地調査 ヒアリング	2023年8月4日	・ 大谷石採掘場跡ほかの現地調査・ヒアリングを実施
第3回	2023年9月12日	・ 調査研究（目次）について討議 ・ 視察候補について検討
第4回	2023年10月17日	・ 調査研究内容について検討 ・ 視察先ヒアリングについて検討
現地調査 ヒアリング	2023年11月13日	・ 首都圏外郭放水路現地調査・ヒアリングを実施
第5回	2023年11月14日	・ 調査研究内容について検討 ・ 視察先ヒアリングについて検討
現地調査 ヒアリング	2023年11月28日 ～11月29日	・ 神戸三宮地下街、寝屋川北部地下河川、淀川左岸線（2期）工事の現地調査・ヒアリングを実施
第6回	2023年12月19日	・ 執筆作業進捗確認を実施 ・ 報告書記載事例の内容確認を実施
第7回	2024年2月1日	・ 報告書および概要版原稿の確認、校正を実施

2. 生活基盤等の安全保障に資する地下インフラの運用に関する調査研究

2.1 調査経緯・調査方法

2.1.1 調査方針

1970年代の石油危機において、日本政府はエネルギー安全保障のため様々な施策を実施したが、これらは化石燃料依存を解消する根本的な解決策とはならなかった。その中で原子力発電は一つ的手段であったが、エネルギー自給率は20%を大きく超えず、福島第一原発事故後は6%まで低下し、10基の再稼働はあったものの、2020年時点でのエネルギー自給率は11%に過ぎず、今もなお危機的な状況が続いている¹⁾。

エネルギー安全保障を本質的に向上させる最大の手段は再生可能エネルギー（再エネ）の採用である。再エネは「純国産」であり、特に風力や太陽光は化石燃料よりも豊富で、枯渇する心配もなく、輸出入のリスクもない。再エネは価格の変動も少なく、エネルギー安全保障において非常に重要な価値を持つ。日本は化石燃料に乏しいが再エネ資源に恵まれており、そのため他国よりも先進的に再エネを導入すべきだと考えられる¹⁾。2023年2月、政府は「GX実現に向けた基本方針」をとりまとめ、閣議決定した。その内容は今後10年を見据えており、GX推進のためのエネルギー政策と、「成長志向型カーボンプライシング構想」の具体的な実現・実行である²⁾。

2023年からの2年間は、多目的型地下インフラモデルの調査研究がテーマとなっており、地下空間を経済的、効率的に利用するため、多目的に人流、物流、備蓄、避難等に対応できる地下インフラを構想し、多目的型の地下インフラモジュールを提案することを目的としている。このうち、第1部会では、経済等の安全保障に資する地下インフラの運用方法のうち、エネルギー関連の安全保障について調査研究を行うものとする。2023年度は、急速に改革が進められているエネルギーの安全保障の現状と今後の見通しについて調査を行う。

2.1.2 調査内容

本報告書では、生活基盤等の安全保障に資する地下インフラ運用方法のうち、エネルギー関連の安全保障の調査研究として、下記の6分野にわたり国内外の現状について調査を実施し、課題および問題点を抽出した。

- ①エネルギー安全保障
- ②熱利用技術
- ③発電技術
- ④エネルギー貯蔵技術
- ⑤核エネルギー利用技術
- ⑥世界の地下都市

詳細は、「2.2 調査研究のまとめ」にて報告する。

2.1.3 見学・調査状況

エネルギー安全保障の現状を把握するため、エネルギー関連施設である福島再生可能エ

エネルギー研究所および福島第一原子力発電所の2か所にて、見学および調査・ヒアリングを実施した（以下、GEC ニュースを引用）。

(1) 産業技術総合研究所（AIST） 福島再生可能エネルギー研究所（FREA）

FREA は国立研究開発法人である AIST に 2014 年 4 月に設置された研究所である。再生可能エネルギーの研究に特化し、太陽光・風力発電の運用・保守を含む高度化、水素活用をコアにエネルギーネットワークのスマート化、ならびに地熱・地中熱の利用拡大に向けた研究が進められている。また福島震災復興支援に注力しており、福島県の沿岸 15 市町村に立地する企業との連携により、技術シーズ開発・事業化支援事業も進められている。

水素キャリアの研究では、アンモニアをキャリアとした研究開発や、固体水素吸着材などの研究が進められ、民間企業との共同研究も積極的に取り組んでいる。また、今後の水素社会への移行を見据えて、さらなる研究施設の増強も進められている。

太陽電池モジュールの研究では、特に発電効率の向上に取り組んでおり、発電効率をほぼ理論値上限である 28%まで向上させることに成功した。



図 2.1.3-1 FREA 実証フィールド（太陽光発電設備と風力発電設備）



図 2.1.3-2 FREA エネルギー管理棟屋上にて

(2) 東京電力福島第一原子力発電所および東京電力廃炉資料館

東京電力福島第一原子力発電所では、中長期ロードマップに基づいて廃炉に向けた取り組みが進められている。現地では発電所構内で進められている現在の作業を中心に説明を受けながら見学し、続いて廃炉資料館で事故発生時の状況と現在の取り組みを見学した。

福島第一原子力発電所の 3、4 号機では使用済燃料プールからの燃料取出しが完了し、現在は 1、2 号機の使用済燃料プールからの燃料取出しに向けた作業と、1～3 号機の格納容器底部に溜まる燃料デブリの取出しに向けた作業が進められている。燃料デブリの取出しは 2 号機から試験的に着手する計画である。原子炉建屋近傍はまだ放射線量が高いため、粉塵の飛散防止剤の定期的な散布、作業構台を別の場所で組立て現地搬入を行う、遠隔操作の建設機械を利用するなど、様々な工夫と対策が講じられている。



図 2.1.3-3 1号機前視察状況

汚染水は原子炉建屋内へ地下水や雨水が流入し燃料デブリに触れることにより発生す

る。対策として地表面の被覆（フェーシング）、凍土壁による遮水、地下水バイパスなどが行われ、対策前の発生量 1 日約 500m³ から現在は 1 日 90m³ 程度に減少している。汚染水はセシウム吸着装置（キュリオン、サリーなど）や多核種除去設備（ALPS）で、トリチウム以外の濃度を基準値（告示濃度限度）以下に低減させ、処理水として敷地内に 1,000 基以上あるタンクに貯められている。さらに大量の海水で希釈することで、トリチウムも基準値を大幅に下回る。廃炉に向けては長期にわたり非常に多くの作業が必要なことを実感した。また、専門家等の意見をもとに処理水でヒラメやアワビを養殖し、通常のものと同様と比較・公開するなど、関係者等への情報公開に注力していることも確認した。

最後に今回の見学・調査にあたって調整と現地のご案内ならびにご説明を頂いた、産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所の谷様、清水様、東京電力ホールディングス（株）の関係各位に御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) (公財)自然エネルギー財団：エネルギー安全保障のための脱炭素（参照 2023.10）
<https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20220308.php>
- 2) 資源エネルギー庁：激動するエネルギーの「今」を知る！「これから」を考える！「エネルギー白書 2023」（参照 2023.10）
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/energyhakusho2023.html>



図 2.1.3-4 1～4号機前視察デッキにて



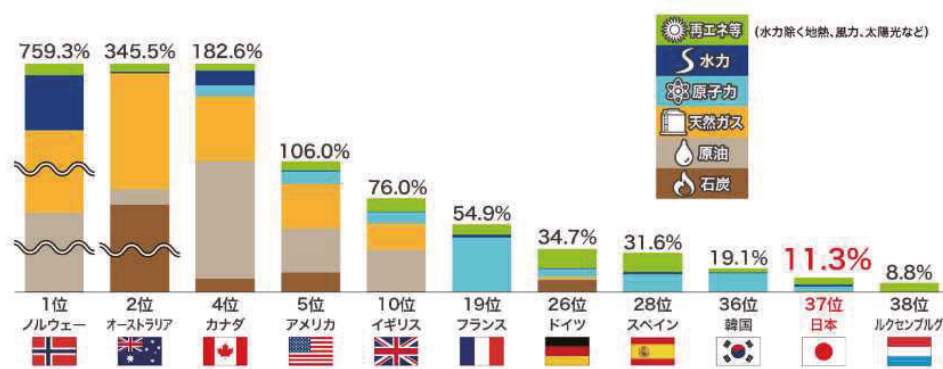
図 2.1.3-5 入退域管理棟壁面の協力企業看板

2.2 調査研究のまとめ

2.2.1 エネルギー安全保障の現状と課題

(1) エネルギー自給率

2020 年度における我が国のエネルギー自給率は、11.3%であり、経済協力開発機構(OECD)38 か国中 37 位と、極めて低い水準にある¹⁾。東日本大震災前の 2010 年度には、日本のエネルギー自給率は 20%台まで上昇していたが、原発事故による原子力発電所の停止などの影響により、2011 年度にエネルギー自給率は急激に低下し、6%台の低水準が続いた。その後、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギー設備容量の増加により、2021 年度には化石燃料依存度を 83%まで低減し、東日本大震災前の水準に近づけることができています。



出典：IEA「World Energy Balances 2021」の2020年推計値、日本のみ資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」の2020年度確報値。※表内の順位はOECD38か国中の順位

図 2.2.1-1 主要国の一次エネルギー自給率比較（2020 年度）

出典：資源エネルギー庁¹⁾

(2) エネルギー価格の高騰

日本の電気料金は、東日本大震災後の原子力発電所停止と化石燃料依存により 2014 年まで上昇し、その後高止まりが続いている状態である。2020 年のコロナ禍で一旦価格が下がったものの、その後の経済回復に伴い 2021 年には家庭用電気料金は 2010 年以降最高値を更新した。2022 年以降は、ロシアによるウクライナ侵攻の影響により、化石燃料供給が逼迫したことで電気料金の上昇に歯止めが掛からず、企業や学校の活動、市民の生活にも影響が及んでいる。電気料金高騰の要因としては、2012 年に導入された再生可能エネルギー発電の固定価格買取制度の影響も存在する。

(3) グリーントランスフォーメーション (GX) の取組み

脱炭素社会の実現に向けた動きは加速しており、2050 年までのカーボンニュートラルを表明している国・地域は COP26 終了時 (2021 年) に 154 か国と急増した。2070 年までの実現を表明している国・地域は、世界 GDP の約 90%を占めるに至った。カーボンニュートラルの実現には、国際協力の他、各国において官民が協力して取り組む必要がある。産業界における排出量取引制度や炭素税といったカーボンプライシングについても、様々な国・地域で制度設計や導入が進んでいる。世界銀行によると、2021 年の世界全体のカーボンプライシングの総額は 840 億ドルに及んでいる²⁾。

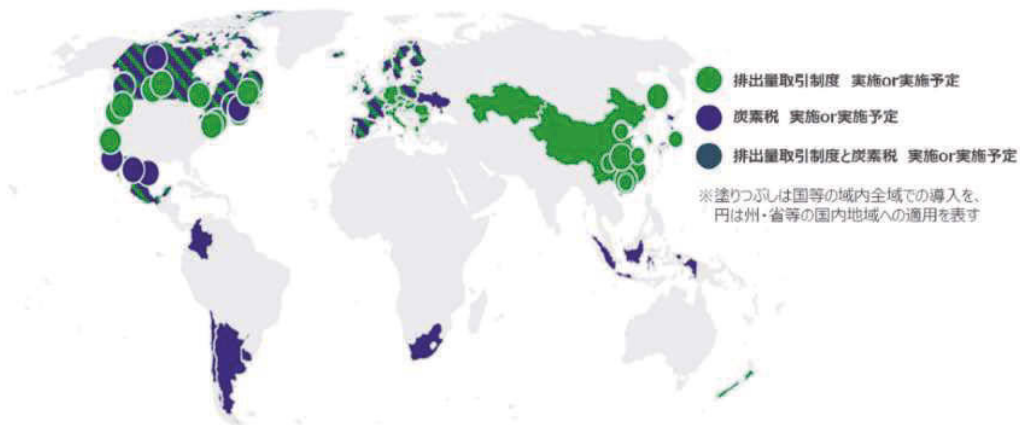


図 2.2.1-2 カーボンプライシングの導入国（2022年4月時点）

出典：資源エネルギー庁²⁾

(4) エネルギー安全保障に関する国の施策

エネルギーの安定供給と脱炭素社会の実現を両立するためには、安全性を最優先させたうえで、安定供給、経済効率性、環境適合のバランスを取りながらエネルギー政策を進めていく必要がある。政府は、S+3E（Safety + Energy Security, Economic Efficiency, Environment）のエネルギー政策の基本方針を掲げている。これらエネルギーの安定供給、GX への取組み、国の施策等の背景を踏まえ、今年度の調査を実施した。

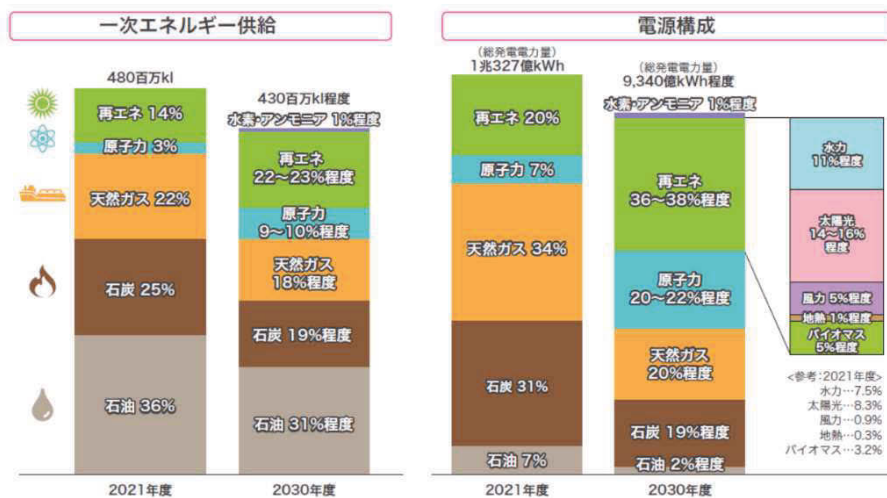


図 2.2.1-3 一次エネルギー供給/電源構成の見通し

出典：資源エネルギー庁¹⁾

【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁：2022-日本が抱えているエネルギー問題（前編）（参照 2023.9）
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/energyissue2022_1.html
- 2) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2023 第1部第3章 GX（グリーントランスフォーメーション）の実現に向けた課題と対応（参照 2023.9）
https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/1_3.pdf

2.2.2 熱利用技術の現状と課題

(1) 地中熱

地中熱は、再生可能エネルギーの中でも「太陽光や風力と異なり天候に左右されない」といった安定性があり、「空気熱利用と異なり大気中へ排熱を出さない、年間を通して一定の温度であり外気温との温度差を活用できる」など省エネルギーでCO₂の排出量を削減できるメリットを有しており、ヒートアイランド現象の緩和や地球温暖化対策への効果が期待されている。この地中熱を利用したヒートポンプシステムは、高い省エネルギー性や環境負荷低減効果を有した技術であり、認知度向上や普及促進を一層図っていくことが重要となる。

現在多くの地域で利用されている地中熱ヒートポンプシステムは「クローズドループ方式」と「オープンループ方式」の2つのタイプに分けることができる。一般的に、地面を掘ってすぐに地下水面が現れる場所や地下水が速く流れている場所では「クローズドループ方式」を、地下水を蓄えている地層に厚みがある場所では「オープンループ方式」を選ぶとよいと考えられている。図2.2.2-1に地中熱ヒートポンプシステムの概念図を示す。

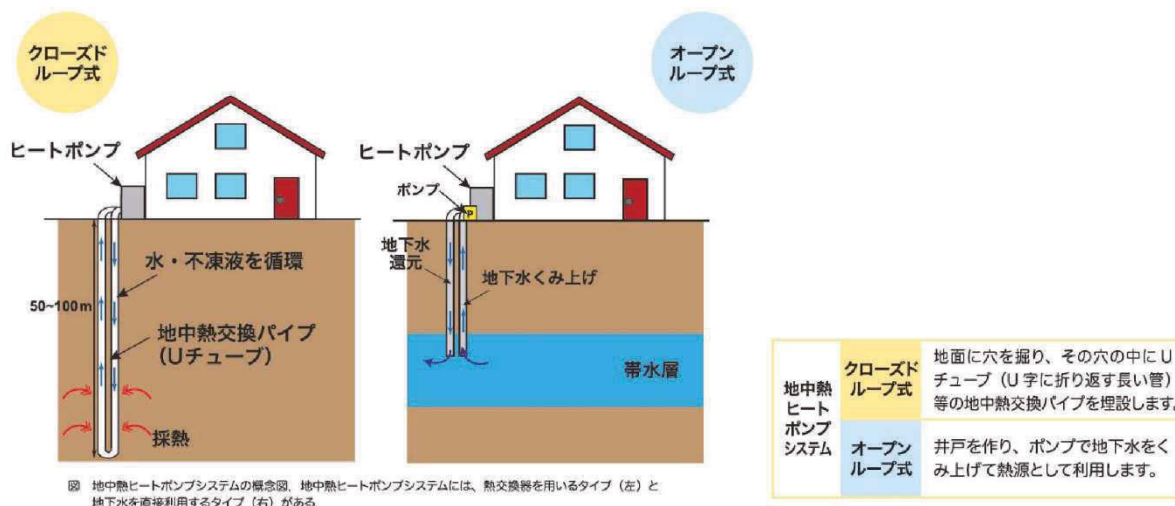


図 2.2.2-1 地中熱ヒートポンプシステムの概念図

出典：(国研)産業技術総合研究所¹⁾

(2) 未利用エネルギー

「未利用エネルギー」とは、夏は大気よりも冷たく、冬は大気よりも温かい河川水・下水等の温度差エネルギーや、工場などの排熱といった、今まで利用されていなかったエネルギーのことを意味する²⁾。具体的な未利用エネルギーの種類としては、①生活排水や中・下水・下水処理水の熱、②清掃工場の排熱、③変電所の排熱、④河川水・海水・地下水の熱、⑤工場排熱、⑥地下鉄や地下街の冷暖房排熱、⑦雪氷熱などがある。

現状の課題としては、未利用エネルギー源が存在しても、近隣に需要家が存在しない場合や、需要家が存在しても十分に活用できる未利用エネルギー源が存在しない場合には、未利用エネルギーを活用した地域熱供給システムが成り立たないことが考えられることである。

(3) 地熱発電

日本は世界第3位の地熱資源を有しており、今後の導入拡大が期待されている。地熱発電はCO₂排出量がほぼゼロで、持続的に発電が可能な再生可能エネルギーであり、天候などの自然条件に左右されず安定的に発電できる「ベースロード電源」でもある。にもかかわらず、実際に導入されている発電設備容量は、現在約60万kWにとどまっており、資源量に対する割合からすると、世界的に見ても少ないといえる。

その理由として、地熱が目に見えない地下資源であり、開発にかかるリスクやコストが高いこと、また地熱資源が火山地帯にかたよって存在していることなどが挙げられる。地熱を利用することで温泉資源への影響や、関連する法令の規制など社会的な面での課題もある。しかし、2050年カーボンニュートラル達成という大きな目標を実現するためには、地熱発電のポテンシャルをもっと生かしていくことが必要である³⁾。

地熱資源は火山性の地熱地帯で、マグマの熱で高温になった地下深部（地下1,000～3,000m程度）に存在する。地表面に降った雨や雪が地下深部まで浸透し、高温の流体、すなわち地熱流体となる。地熱流体が溜まっているところを地熱貯留層という。地熱貯留層の上にはキャップロックがある。なお、地熱貯留層となるには、熱・水・割れ目の3要素が必要となる⁴⁾。

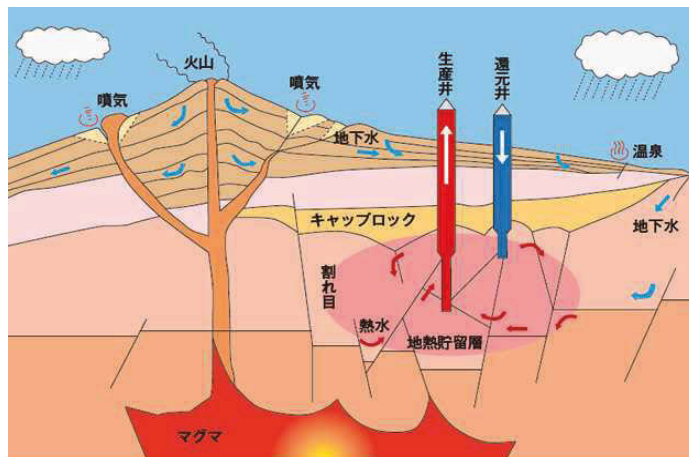


図 2.2.2-2 地熱貯留層のイメージ図

出典：日本地熱協会⁴⁾

【参考文献】

- 1) (国研)産業技術総合研究所 地質調査総合センター：地質標本館特別展 地中熱 あなたの足元に再生可能エネルギー（参照 2023.10）
<https://www.gsj.jp/Muse/exhibition/archives/src/202304geoheatbook.pdf>
- 2) 資源エネルギー庁：令和3年度エネルギーに関する年次報告書（参照 2023.10）
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/html/2-1-3.html>
- 3) 資源エネルギー庁：もっと知りたい！エネルギー基本計画④（参照 2023.10）
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykihonkeikaku2021_kaisetu04.html
- 4) 日本地熱協会：地熱発電のしくみ（参照 2023.10）
<https://www.chinetsukyokai.com/information/index.html>

2.2.3 発電技術の現状と課題

2023年2月に閣議決定された「GX実現に向けた基本方針」では、化石エネルギーへの依存が高く脆弱な日本のエネルギー需給構造を変革し、エネルギーの安定供給を前提とした産業競争力強化と脱炭素社会の同時実現を目指す方針を示した¹⁾。

ここでは、エネルギーの安定供給と脱炭素社会の実現に貢献する各種発電方式の調査結果を報告する。

(1) 火力発電

火力発電は化石燃料に依存しCO₂を大量に排出するが、再生可能エネルギーの発電量変動を補う調整力として、今後しばらくは重要な電源であり続けると予想される。しかしながらCO₂排出削減のためには、火力発電の脱炭素化、非効率な火力発電所の休廃止、火力発電所の高効率化等の施策が必要である。

(2) 水力発電

水力発電は天候に左右されず、エネルギー変換効率が約80%と非常に高く、火力発電の35~43%と比して約2倍のエネルギー変換効率となっている。またCO₂を排出しないクリーンなエネルギーであり、輸入資源に頼らないため安定供給可能なエネルギーといえる²⁾。

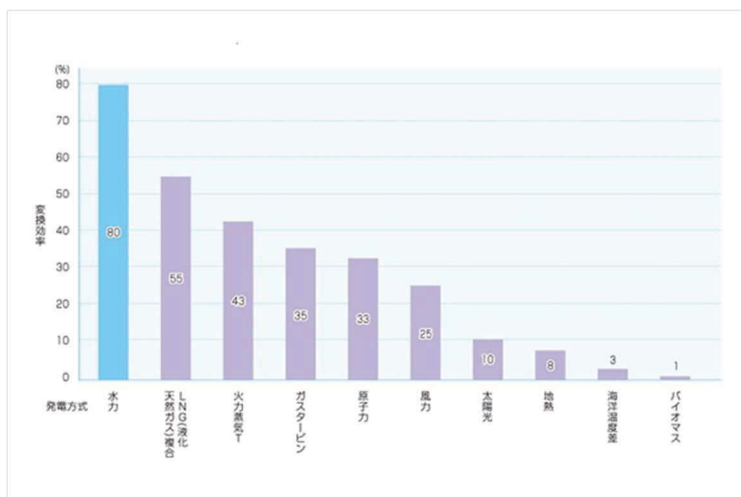


図 2.2.3-1 各種発電方式別にみたエネルギー変換効率

出典：関西電力(株)²⁾

(3) 太陽光発電

有機系のペロブスカイト太陽電池は、直近7年間で変換効率が2倍に向上するなど急速に性能が向上している。製造コストが安く、軽量で柔軟、主要材料が国内供給可能なヨウ素であることから有望視されているが、現状では、寿命が短い（耐久性が低い）、大面積化が困難、更なる変換効率の向上などの課題がある³⁾。

(4) 風力発電

風力発電は、陸上風力発電と洋上風力発電に分類される。陸上風力発電は、施工性、コスト、メンテナンスの利点を活かし、大規模ウインドファームから地域発電、非常用施設、島嶼や都市の小型発電所、補助電源としての小規模設備まで幅広く利用されている⁴⁾。洋上風力発電では、送電線・通信ケーブルは海底に設置され、陸上と比較して風況の安定している洋上に発電施設が設置されるため安定した発電が可能である。

(5) 潮力発電

潮力発電は、潮汐によって生じるエネルギーを利用して電力を発生させる発電方法であり、潮流発電と潮汐力発電の2つの種類がある。

また潮流発電、潮汐力発電ともに、景観上の配慮や厳しい環境条件に耐え得る設備の選定が必要である。

(6) コージェネレーションシステム

コージェネレーションシステム（コジェネ）は、電力と熱を同時に生み出すシステムであり、発電時に発生する熱を給湯や暖房などに再利用することができる。

日本におけるコジェネは、コジェネで自家発電した電力を電力事業者の電力系統に供給することが認められるようになった1980年代後半から普及が進んだが、ヒートポンプの普及や火力発電の効率の向上などが進み2004年をピークに足踏み状態が続いている。今後は、廃熱を高温の蒸気として供給する産業系での利用が主流になると言われている⁵⁾。

(7) バイオマス発電

バイオマス資源は、廃棄物、未利用資源、生産性資源の3つに分類でき、エネルギー以外にも飼料、肥料、建材など多岐にわたる用途がある。

バイオマス発電は他の再生可能エネルギーと異なり発電に燃料が必要であり、木質バイオマスの場合、燃料費がコストの大部分（約70%）を占めており、コスト削減が課題となっている⁶⁾。

(8) アンモニア発電

アンモニアは燃焼してもCO₂を排出しないためアンモニアを単独でエネルギー源とする発電技術の開発が進行中である。アンモニアを石炭火力発電に混ぜて使用し（混焼）、CO₂排出を削減する発電技術もまた開発が進んでいる。

アンモニア発電は大きなCO₂排出量削減効果があるものの、供給不足による価格高騰など化石燃料と同様の課題も存在しており、製造、輸送、貯蔵、供給までを含むサプライチェーンの形成が必要である。

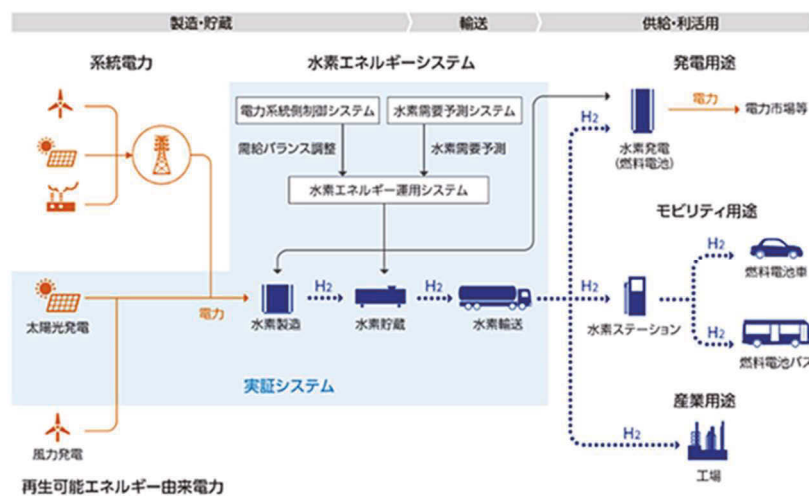


図 2.2.3-2 「福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R）」の概要の全体像
出典：NEDO⁸⁾

(9) 水素発電

水素は、電気による水からの抽出だけではなく、石油や天然ガス、メタノールやエタノール、下水汚泥、廃プラスチックなど、さまざまな資源から生成可能である。

水素の社会実装には、供給コストの削減と需要創出による水素コスト低減が必要である。現状の水素コストは 100 円/Nm³程度で、資源エネルギー庁では、2030 年頃に 30 円/Nm³程度、将来的に 20 円/Nm³程度まで水素コストを低減することを目標に掲げている⁷⁾。また国内の水素コスト低減を目指して水素製造の研究開発が行われており、福島県浪江町の「福島水素エネルギー研究フィールド (FH2R)」では 1 万 kW のアルカリ型水電解装置を使用した水素製造プロジェクトが進行中である (図 2.2.3-2)。

【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁：第 2 回「GX 実現に向けた基本方針」についての全国説明・意見交換会情報(参照 2023.9)
<https://www.enecho.meti.go.jp/information/gx/02.html>
- 2) 関西電力(株)：再生可能エネルギーへの取組み 水力発電の概要(参照 2023.9)
https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/newenergy/water/shikumi/index.html
- 3) 資源エネルギー庁：「次世代型太陽電池の開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要(参照 2023.12)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/001_06_00.pdf
- 4) (一社)日本応用地質学会 環境地質研究部会 佐伯 佳美：風力発電と地形・地質 (その 2 : 陸上風力発電), 応用地質 第 42 巻 6 号,2021.6
- 5) 環境展望台 HP：ユージェネレーション(参照 2023.9)
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=8>
- 6) 資源エネルギー庁：持続可能な木質バイオマス発電について,令和 2 年 7 月 20 日 (参照 2023.9)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/biomass_hatsuden/pdf/001_02_00.pdf
- 7) 資源エネルギー庁：水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況 2020 年 6 月 8 日 (参照 2023.9)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/roadmap_hyok_a_wg/pdf/002_01_00.pdf
- 8) NEDO：再エネを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」が完成,2020.3.7 (参照 2023.9)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html

2.2.4 エネルギー貯蔵技術の現状と課題

ここでは、エネルギーの安定供給に関する貯蔵技術の調査結果を報告する。

(1) 蓄電システム他

定置用蓄電システムは、これまで再エネ電源などに1対1で接続することで、個々の電源の安定化や有効利用に寄与してきた。

今後更なる再エネ導入拡大に向け、様々な種類の蓄電池をグリッドに接続し、調整力などの多様な価値を提供していくことが期待される。

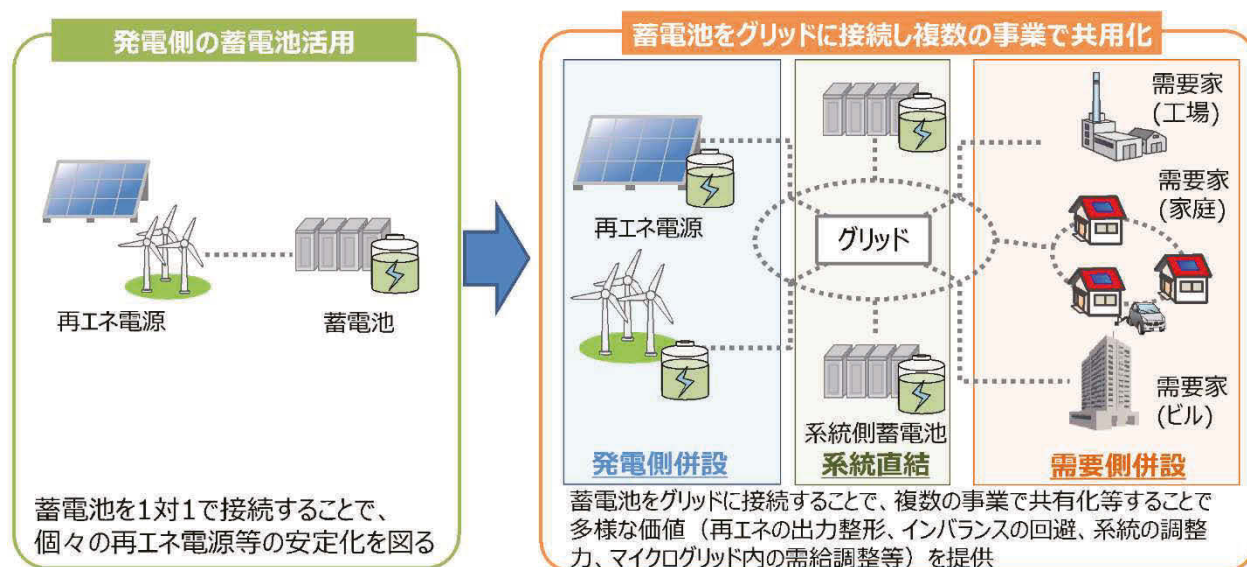


図 2.2.4-1 再エネ拡大に向けた取り組み（案）

出典：資源エネルギー庁¹⁾

現在開発が進められている蓄電システムの種類を以下に示す。

- ① リチウムイオン蓄電
- ② 水素貯蔵
- ③ 揚水発電
- ④ 熱エネルギー式貯蔵（蓄熱）
- ⑤ 圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)
- ⑥ フライホイールエネルギー貯蔵

ここで、業務・産業用の蓄電システムが抱える課題については、経済産業省において以下のとおり整理されている。

- ① 設備の費用が高い
- ② 設計・調達・建設費用が高い
- ③ 品質面で良い製品が正しく評価されない
- ④ 幅広い需要家に導入が進まない

これらの課題に対して、定置用蓄電システム普及拡大検討会では、導入見通しの設定や目標価格の設定、評価方法の統一などを示して、課題解決に取り組んでいる。

(2) CCS (CO₂回収・貯留)

1) 苫小牧における CCS 大規模実証試験

苫小牧では、日本初となる CCS の大規模実証試験 (CO₂ の分離・回収、圧入、貯留、モニタリング) が国家プロジェクトとして実施されている。

2016 年度から地中への CO₂ 圧入が開始され、2019 年 11 月 22 日には、目標である累計 30 万トンの CO₂ 圧入が達成され、現在は圧入を停止しモニタリングが行われている。

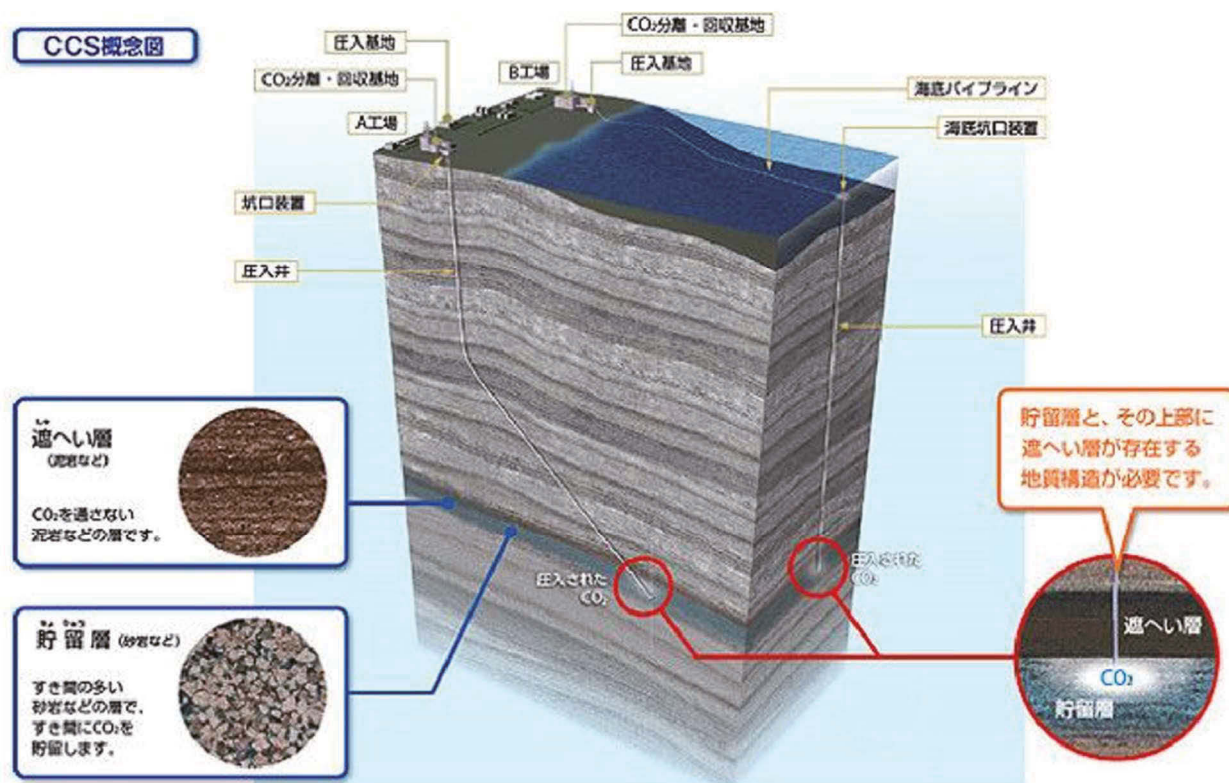


図 2.2.4-2 CCS の概念図 (画像提供：日本 CCS 調査株式会社)

出典：苫小牧市²⁾

2) 苫小牧 CCS 実証試験の成果³⁾

実証試験により以下に示す知見を得ている。

- ① 各種モニタリングおよび海洋環境調査により、CCS が安全かつ安心できるシステムであること
- ② 地震に関連する不安を、収集したデータに基づき払拭したこと
- ③ 自然地震が起きても、貯留した CO₂ に影響が及ぶことはなかったこと
- ④ 貯留地点近傍で圧力との関連を疑うべき微小振動、自然地震は検知されなかったこと

3) 苫小牧 CCS 実証試験から得た社会実装への課題³⁾

実証試験により、2030 年までの商用化に必要な課題を確認している。課題項目を以下に示す。

- ①低コスト化
- ②CO₂輸送手段の確立
- ③貯留適地の確保
- ④事業環境整備

(3) CCUS(分離、貯留したCO₂の利用)

「2050年カーボンニュートラル宣言」を受け、脱炭素社会を目指す動きは、今後加速していくものと思われる。北海道においても「ゼロカーボン北海道」を表明し、苫小牧エリアにおいてCCUS実施に向けた積極的な取組みを推進している。CO₂を地中貯留することに加えて有効活用するCCUSは、CO₂ネットゼロ実現に貢献する技術として早期の実用化が期待されている⁴⁾。

【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁：今後の再生可能エネルギー政策について,2022.4.7(参照 2023.10)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/040_01_00.pdf
- 2) 苫小牧市：苫小牧におけるCCS大規模実証試験(参照 2023.8)
<https://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/kigyoritchi/ccs/ccsnogaiyo.html>
- 3) 環境省 HP：苫小牧におけるCCS大規模実証試験ご説明資料,2022.10.7(参照 2023.8)
<https://www.env.go.jp/content/000081046.pdf>
- 4) 経済産業省 HP：出光興産、北海道電力、JAPEXの3社が北海道・苫小牧エリアにおけるCCUS実施に向けた共同検討を開始(参照 2023.10)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/006_s02_00.pdf

2.2.5 核エネルギー利用技術の現状と課題

脱炭素化の取組みが世界的に推進されている中、日本は2050年カーボンニュートラルの達成と再生可能エネルギーの主力電源化を目標に掲げている。そのなかでも原子力は、長期的なエネルギー需給構造の安定に重要な電源として位置づけられている。

ここでは、原子力発電の現状と開発の取組み、および使用済み核燃料の地下処分について調査した結果を報告する。

(1) 原子力発電

1) 原子力発電

原子力発電は蒸気でタービンを回して発電する手法であり、この点については火力発電と同じである。火力発電ではボイラーで化石燃料を燃焼させた熱で蒸気を発生させるのに対して、原子力発電では原子炉でウランを燃料とした核分裂エネルギーによる熱で蒸気を発生させている。

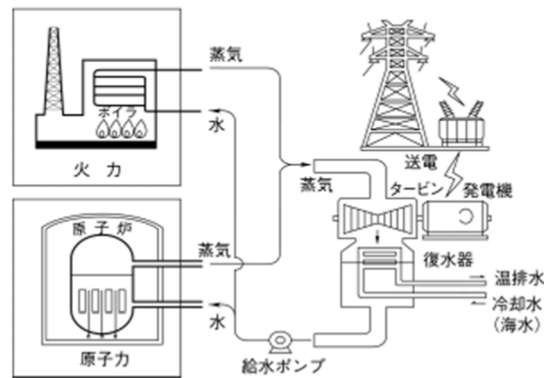


図 2.2.5-1 火力・原子力発電イメージ

出典：内閣府原子力委員会¹⁾

日本において現在商用運転を行っている原子炉は「軽水炉」と呼ばれるものであり、これは核分裂により放出される中性子の速度を減速させる減速材に軽水が使われている。

2) 小型モジュール炉 (SMR)²⁾

従来の電気出力 1,000 MW 超の原子力発電所と比べ、1 基ごとの出力を小さくすることで原子炉の冷却を容易にし、安全性を高めた小型モジュール炉 (SMR) である。

国際原子力機関 (IAEA) の定義によれば、電気出力 300 MW 以下の原子炉が SMR となり、SMR は、安全性、工場生産性、立地・運転・利用に関する柔軟性などの観点から、各国で開発および導入検討が積極的に行われている。

(2) 放射性廃棄物

放射性廃棄物は大きく分けて「高レベル放射性廃棄物」と「低レベル放射性廃棄物」に分類される。その識別については高レベル放射性廃棄物以外のものを低レベル放射性廃棄物と呼ぶ。

1) 高レベル放射性廃棄物とは³⁾

放射能レベルの高い廃液を高温のガラスと溶かし合わせて固体化したものを、高レベル放射性廃棄物 (ガラス固化体) と呼ぶ。

高レベル放射性廃棄物の放射能レベルが低下するには長い時間がかかり、その間、人が近づかないようにする必要がある。ただし、高レベル放射性廃棄物は安定した物質で、爆発性はなく放射性物質が連続的な核分裂 (臨界) を起こすことはない。

2) 低レベル放射性廃棄物とは⁴⁾

低レベル放射性廃棄物は、発生場所や放射能レベルによってさらにいくつかの区分に分けることができ、原子力発電の運転に伴い発生する放射性廃棄物を区分別にまとめると表 2.2.5-1 のようになる。

なお、低レベル放射性廃棄物については、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分場所の確保などの取組みを進めることを基本としている。

表 2.2.5-1 放射性廃棄物区分

廃棄物の種類			廃棄物の例	発生源
高レベル放射性廃棄物			ガラス固化体	再処理施設
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	高↑放射能レベルの比較的高い廃棄物	制御棒、炉内構造物	原子力発電所
		放射能レベルの比較的低い廃棄物	廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化	
		放射能レベルの極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等	
超ウラン核種を含む放射性廃棄物			燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設 MOX燃料加工施設
ウラン廃棄物			消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設
クリアランスレベル以下の廃棄物			原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生源

出典：資源エネルギー庁⁴⁾

(3) 核エネルギー利用技術の現状と課題のまとめ

1) 原子力エネルギー利用技術について

脱炭素、カーボンニュートラルの観点から原子力エネルギーの利用は有効であり、諸外国においても原子力新技術の研究開発に投資を行っている。その中でも小型モジュール炉（SMR）の開発・運用に関しては、コスト・安全性の観点から注目を集めている。

しかしながら現在 SMR についての開発・建設計画の中止を発表している事業者もあり、その原因については発電コストの上昇が挙げられ、プロジェクトの継続資金調達が困難となっている。今後は研究開発・技術発展による運用コストの低減が課題である。

2) 放射性廃棄物について

放射性廃棄物の処分は低レベル、高レベルともに放射能の減衰に長期間を要するものであり、発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしない認識のもと基本方針が閣議決定された。

最終処分については喫緊の課題であるが、慎重に進める必要もあり長期化することで現世代での責任を果たせるか懸念される。

【参考文献】

- 1) 内閣府原子力委員会：原子力のすべて, 原子力について対話できるホームページ
2003年12月（参照 2023.10）
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/sonota/study/aecall/index.html>
- 2) (国研)日本原子力研究機構：海外における SMR の開発・導入動向, 2021年10月14日
（参照 2023.10）
https://www.jaea.go.jp/04/sefard/ordinary/2021/20211014.html#tre_usa

3) 資源エネルギー庁：高レベル放射性廃棄物とは（参照 2023.10）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html#h01

4) 資源エネルギー庁：放射性廃棄物について区分と発生（参照 2023.10）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html#h01

2.2.6 世界の地下都市

世界には、数多くの地下都市が存在する。その特性は、土地の成り立ちや、気象条件、歴史・文化に大きく影響を受け、最適化されている。例えば、モントリオールなど、大陸の寒冷地における地下都市は、土地を大規模に開発・連結することで、寒冷気候へ対応してきた。一方、東京やソウルなど、東アジアの過密都市は、地上施設を地下へ移設することで、都市をコンパクトに進化させてきた。

以下に、世界の代表的な地下都市の現状をレビューし、今後の地下開発・利用研究における参考資料とする。

(1) 地下都市の現状

1) モントリオール（カナダ）

モントリオールの冬は非常に厳しい。真冬の気温は、零下 30℃まで低下する。降雪量は、年平均 2.1 メートルにも及ぶ。

1962 年、都市設計家のビンセント・ボンテ指揮のもと、地上の厳しい天候を避けながら、街を移動できる地下空間の創出が始まった¹⁾。その構成は、プラス・ビル・マリーという高層ビルとその地下店舗が、トンネルでモントリオール中央駅およびクイン・エリザベス・ホテルに連結したことからスタートした。

本地下都市は、ネットワークを意味するフランス語（レゾー）をもじり RESO と呼ばれている。現在、RESO の総延長は、32km に及んでいる。入り口の数は、120 にのぼる。地下鉄駅の切符売り場には、芸術的な照明彫刻が施されるなど、市民空間としての発展度が高い¹⁾。

モントリオールでは、市中心部の商業施設の約 40%、中心部オフィスの約 80% が地下で接続している。また、住宅は 1,250 戸、ホテルは 4,000 室が地下に存在する（1997 年時点）²⁾。

2) ボストン（アメリカ）

ボストンは、1700 年代半ばまで、イギリス領アメリカにおける最大都市であった。アメリカで初めて公立学校や公園、地下鉄が造られた都市は、ボストンである。そのため、ボストン市民は、ボストンが現在も革新的な都市であることを自負している¹⁾。

上記した歴史背景を基に、ボストンでは、交通問題への解決もいち早く取り組まれてきた。ボストンでは、現在、自動車やバス専用の地下トンネルが 10 本ほど建設されている。それらの地下トンネルは、地上にオープンスペースや公園などの建設を推進させている¹⁾。



図 2.2.6-1 地下道路網の整備後の状況

出典：マーク・オープンデン¹⁾

3) 東京（日本）

東京都市圏は、3,800 万人以上が暮らす世界一人口の多い経済圏である。一方、日本は、都市空間として使える平地が限られているため、新築ビルでは、専ら地下数階に駐車場を備えている。近年、路上に溢れる自転車の解決策として、地下駐輪場が登場している¹⁾。

地下鉄「銀座線」は、アジア最古の地下鉄であり、その歴史は古い。また、東京の地下鉄駅における廃業駅は、ほとんどない。東京都市圏の地下鉄網は、現在も拡大中であり、世界有数の超過密地下都市を形成し続けている¹⁾。

4) ソウル（韓国）

ソウルの地下街は、東京の八重洲地下街に酷似している³⁾。これは、ソウルと東京における歴史文化や経済、気象条件が類似している点を象徴している。

5) 北京（中国）

1978 年の経済改革に先立つ 10 年間、中国はソ連との戦争の脅威にさらされていた。1969 年に毛沢東は、国民へ北京での地下施設の建設を命じた。北京の国民 30 万人は、手持ち工具で、1 万という数多の地下施設を建設した³⁾。

北京での地下鉄工事では、由緒ある内城壁や城門の一部を取り壊し、大胆に工事を推進した。以上の結果、北京は、近代的な地下都市の構築に成功した。

6) パリ（フランス）

パリのフォーラム・デ・アールは、古くからある中央市場を再開発した施設である。本施設は、郊外高速鉄道と地下鉄との連絡駅並びに、大規模な地下街となった。現在は、商業・文化・スポーツ・娯楽などの施設を設け、活況を呈している¹⁾。

フォーラム・デ・アール内のシャトレ＝レ・アール駅は、様々な路線の乗換駅である。本駅は、75万人/日が利用するヨーロッパを代表する駅であり、駅に併設するショッピングセンターの利用者は15万人/日である。パリ地下鉄は、大陸都市でありながら、東京と並ぶ過密状況を呈している¹⁾。

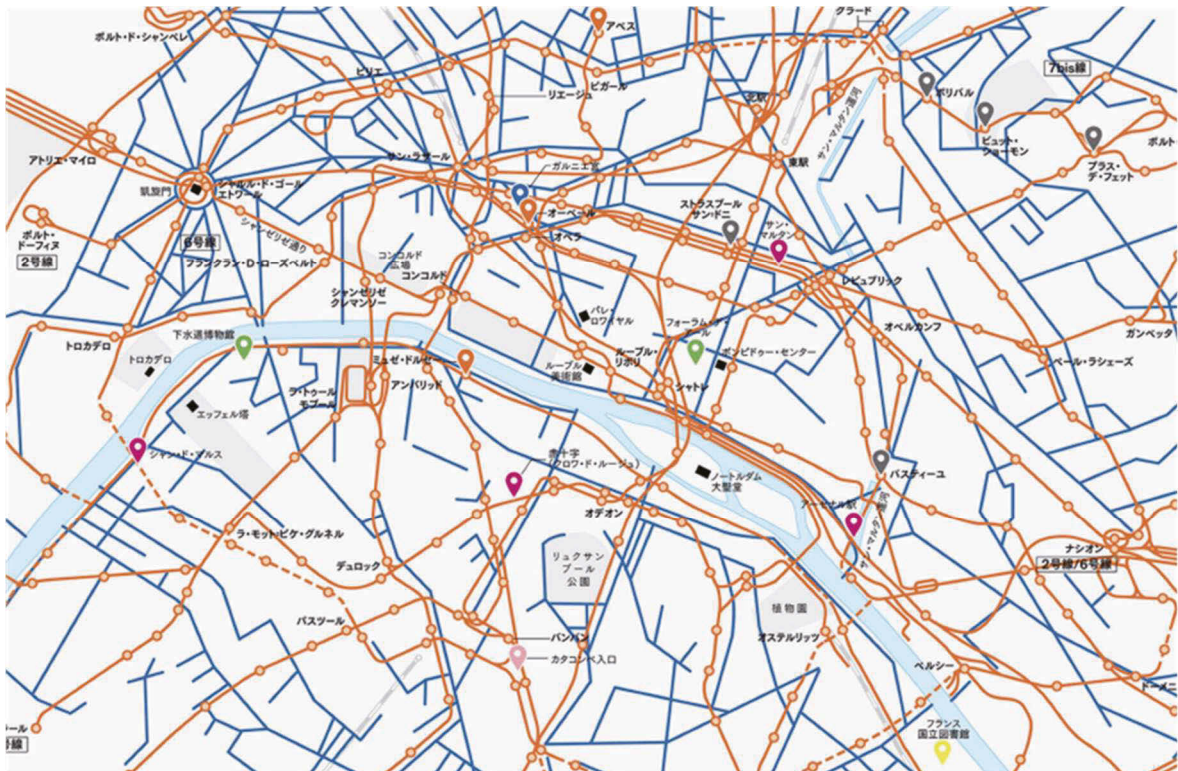


図 2.2.6-2 パリ中心部における地下鉄路線平面図

出典：マーク・オープンデン¹⁾

(2) 地下都市の課題

地下都市の現状に示しているとおり、東京都市圏の地下鉄網は現在も拡大中であり、超過密化が進んでいる。また、パリの地下鉄も東京と並ぶ過密状況を呈しており、過密化に伴いさらに深部で地下鉄網を構築する必要がある。

【参考文献】

- 1) マーク・オープンデン：世界の地下都市 大解剖 立体イラストで巡る、見えない巨大インフラ，電子書籍第1版(2021),発行
- 2) (社)地盤工学会：おもしろジオテク，(1997)，発行
- 3) ソウル市観光財団 HP (参照 2023.9)

<https://japanese.visitseoul.net/shopping/明洞地下ショッピングセンター/JPP009730>

2.3 調査研究のまとめ

2.3.1 調査研究のまとめ

本調査研究では、地下空間を経済的、効率的に利用するため、多目的に人流、物流、備蓄、避難等に対応できる地下インフラを構想し、多目的型地下インフラモジュールを提案することを目的としている。

2023年度の第1部会の調査研究では、経済等の安全保障に資する地下インフラ運用方法として、エネルギーの安全保障の現状と今後の見通しについて調査研究を実施した。エネルギー安全保障の対象として、①エネルギー安全保障の現状と課題、②熱利用技術の現状と課題、③発電技術の現状と課題、④エネルギー貯蔵技術の現状と課題、⑤核エネルギー利用技術の現状と課題、⑥地下都市の現状と課題、の6個のテーマを選定し、それぞれのテーマに関して調査研究を行った。

また、エネルギー安全保障の関連施設として、①福島再生可能エネルギー研究所、②福島第一原子力発電所および廃炉資料館の2施設を選定し、現地に赴き見学・視察・ヒアリング調査を行った。

これらの調査結果をテーマごとにまとめたものを表2.3.1-1に示す。

2.3.2 今後の課題

今年度の調査結果をもとに、現在のエネルギー安全保障に関する課題を、表2.3.1-1に加筆した。これらの課題を踏まえ、2年目となる2024年度には、エネルギー安定供給に関し地下インフラを利用している事例や可能性についてさらに調査を行う。

特に、下水、共同溝、地下鉄、高速道路、地下河川等の地下インフラを利用し、本来とは異なる目的でエネルギーを安定供給した事例を調査し、多目的地下インフラの利用方法や利用の可能性について掘り下げを行う。また、地下を利用したエネルギー貯蔵事例や、地中熱エネルギーのさらなる可能性、太陽光、風力、水力など再生可能エネルギーの利用に関連した地下インフラの使用事例等についても調査を行う。

さらに、発電設備と都市を結ぶ電力ネットワーク、地下空間を利用した省エネルギー技術、カーボンニュートラルや温室効果ガス削減に資する地下空間利用技術など、エネルギーの安定供給に関連した地下利用方法の動向や新技術等について調査・研究を進める予定である。

表 2.3.1-1 エネルギーの安全保障の現状と今後の見通しに関する調査結果のまとめ

本編第1部の項目番号と項目名	調査結果	課題
2.1.1 エネルギー自給率	我が国は国内資源に乏しく、先進国の中でもエネルギー自給率が極端に低い	エネルギーの安定供給には、再エネの割合を増加させ自給率を向上させることが必要
2.1.2 エネルギー価格の高騰	ロシアのウクライナ侵攻など世界的政情の不安等によりエネルギー価格が高騰	電気料金の高騰は市民生活にも影響が生じる。再エネ促進にはコストの低減も必要
2.1.3 GXの取組み	2050年までのカーボンニュートラル実現のため、2030年までに温室ガスの排出量46%削減を目標に設定	エネルギー供給のGX実現のために、自産エネルギーの拡大が必要不可欠
2.1.4 国の施策	脱炭素社会の実現には、安全性を最優先し、安定供給、経済効率、環境適合とのバランスが重要	再エネ割合の増加、原子力発電の再稼働、省エネ技術の導入が課題
2.2.1 地中熱	地中熱ヒートポンプシステムは省エネ効果が高く、ヒートアイランド現象の緩和や地球温暖化対策の効果に期待	ボーリング費用など設置に掛かるイニシャルコストが高い。認知度を向上させ積極的に普及促進を図る必要がある
2.2.2 未利用エネルギー	工場排熱や生活排水、下水、地下鉄などの熱を利用したエネルギー。利用可能量が多く、今後、導入効果に期待	供給源と需要家が近隣地域に存在することが条件
2.2.3 地熱	日本は世界第3位の地熱資源を有しており、CO ₂ を排出しないクリーンなエネルギー源。現在のところ利用量は微小	発電開始までの期間が長く、設置コストも高く、事業リスクが高い。温泉資源の枯渇問題など地域との共生も課題
2.3.1 火力発電	化石燃料に依存するためCO ₂ 排出量が多いが、再生可能エネルギー導入時の調整手段として、今後も必要	革新的低炭素石炭火力発電や酸素吹石炭ガス化複合発電などCO ₂ の排出量削減、分離回収等の技術開発が求められる
2.3.2 水力発電	CO ₂ を排出しないクリーンエネルギーでエネルギー変換効率が80%と高い。輸入資源に頼らないため安定供給可能	気象予測技術と嵩上げを利用したハイブリッドダムへの導入、小水力発電の利用促進のための法規制緩和などが課題
2.3.3 太陽光発電	日本での再生可能エネルギーの中心。現在はシリコン系の太陽電池が主に利用されており、ペロブスカイト太陽電池は今後の事業化が期待	太陽光パネルの変換効率の向上、軽量化、製造コスト低減が課題。景観など地域との共生も必要
2.3.4 風力発電	陸上風力は、施工性、コスト、メンテナンス性に優れ、大規模から小規模まで幅広く利用されている。今後は、浮体式の洋上風力の導入拡大が必要	設置の合意形成にかかる期間の短縮、大型化に向けた風車の内製、洋上での厳しい環境への対応などが課題
2.3.5 潮力発電	潮汐によって生じるエネルギーを利用した発電方法で、潮流発電、潮汐力発電の2種類がある	潮流発電のコストは、火力や太陽光よりも高い。景観や耐久性の検討も必要
2.3.6 コージェネ	自家発電により電力と熱を同時に生み出すシステム。需要家の近くで発電を行うため、熱の有効活用が可能	現在は足踏み状態。今後は、廃熱を高温の蒸気として供給する産業系での利用が主流になる
2.3.7 バイオマス	廃棄物、未利用資源、生産性資源の3つに分類され、物理的変換、熱化学変換、生物化学的変換のエネルギー変換技術がある	木質バイオマスの場合、燃料費がコストの大部分を占め割合高。ごみ焼却は施設が分散しているため発電効率が低い
2.3.8 アンモニア	燃焼してもCO ₂ を排出しないエネルギー源。石炭火力発電に混ぜた混焼技術により、CO ₂ 排出を削減する発電技術の開発が進んでいる	利用の準備は進んでいるが、現状では供給が不足しており、製造、輸送、貯蔵、供給までのサプライチェーンの形成が課題
2.3.9 水素	CO ₂ を排出しないクリーンなエネルギー源であり、再生可能エネルギーからも生成できる。自動車の燃料電池や家庭用燃料電池などにも利用可能	現在は製造コストが高い。今後、需要の創出を含めてコストの低減が課題
2.4.1 蓄電システム	電池貯蔵、水素貯蔵、揚水発電利用など様々な種類がある。再生可能エネルギーを貯蔵し需要量を調整する手段として利用可能	設備費が高い、建設費が高い、製品が正しく評価されない、導入が進まないといった課題がある
2.4.2 CCS	CO ₂ を分離・回収し、地中に貯蔵する技術。苫小牧のプロジェクトでは30万トンのCO ₂ を貯留	CO ₂ の分離・回収のためのコストの割合が大きく、今後の技術開発が必要
2.4.3 CCUS	分離・回収したCO ₂ を資源として有効利用する技術。鉱物化やメタネーションなどがある	実用化に向けた調査や研究が進められている
2.5.1 原子力発電	長期的なエネルギー需給構造の安定のために重要な電源。近年では、1基ごとの出力を小さくし安全性を高めたSMRの開発が進められている	発電コストの上昇などの問題から、SMRの開発プロジェクトの中止が生じている
2.5.2 放射性廃棄物	放射性廃棄物の処分方法には、トレンチ処分、ピット処分、中深度処分、地層処分がある。高レベル放射性廃棄物については、地層処分を行う方針が出されている	地層処分の調査には20年以上の期間を要し、候補地選定のための自治体および地域住民の理解を得る必要がある
2.6 地下都市	寒冷地の地下都市は、土地を大規模に開発・連結することで寒冷気候へ対応。東アジアの過密都市は、地上施設を地下に移設し都市をコンパクトに進化させた	東京都市圏の地下鉄網は現在も拡大中であり、超過密化が進んでいる。パリでも超過密化が進んでいる
3.1 福島再生可能エネルギー研究所	再生可能エネルギーに関する産総研の研究開発拠点で、被災地の支援を行いつつ、世界のイノベーションハブを目指している	エネルギーネットワーク、水素、風力、太陽光、地熱、地中熱など各分野の技術的課題に取り組んでいる
3.2 福島第一原子力発電所および廃炉資料館	2011年の東日本大震災で被災し、炉心溶融や建屋爆発などの重大事故が発生。現在、各号機において廃炉作業が進められている	長期に渡る廃炉作業、汚染水対策、燃料デブリ取り出しなど、難易度の高い作業が続く

3. 備蓄と避難に対応するシェルターとしての地下インフラに関する調査研究

3.1 調査経緯・調査内容

3.1.1 調査方針

北朝鮮による核兵器開発と弾道ミサイル発射、中国の軍事力強化、ロシアのウクライナ侵攻によるミサイル攻撃など、日本を取り巻く安全保障に対する脅威と有事における危機感が高まりつつある。このような背景のもと、武力攻撃から国民の生命・身体・財産の保護にむけて、政府は「防衛力強化や武力攻撃時に関連する法律^注」を整備している。これらの法律に基づいて都道府県や市町村などの地方公共団体は、武力攻撃時の避難先となる堅牢な建築物や地下施設（地下駅舎・地下街・地下道など）を緊急一時避難施設として指定するよう取り組んでいる。特に、緊急一時避難施設として指定されている地下施設は、弾道ミサイルによる爆風や熱線から隔離された地下に位置しており、被害抑制に最も有効であると考えられる。

そこで、本調査研究は、武力攻撃に対して有効性のある地下施設や地下インフラを利用した備蓄と避難に対応する避難施設（シェルター）の提案を行うことを目的とした。

なお、提案の対象とする避難施設（シェルター）は、時間とコストの観点から核兵器などの大量破壊兵器を考慮することが困難であると考え、通常兵器への対応を基本として想定することとした。ただし、将来的には核シェルターへの転用の可能性や諸外国での実例など参考にすべき知見もあると考え、補助的に核シェルターも調査研究対象に含めることとした。

また、用語としての「シェルター」は、法的にも明確に定義されていないこともあり、行政と市民の双方で、使われ方のニュアンス（例として「簡易」対「堅牢」）に違いがあり、注意すべき用語と思われる。そこで、本調査研究は、一時的な簡易避難場所を「避難施設（シェルター）」、核兵器にも対応可能な堅牢なものを「核シェルター」のように、対象がわかるように記載することとした。

3.1.2 調査内容

ミサイル攻撃への有効性のある地下施設や地下インフラを利用した備蓄と避難に対応する避難施設（シェルター）の提案に向けた調査研究を行う。

最初に、武力攻撃による被害想定などを把握するため、弾道ミサイル攻撃の概要とミサイル着弾時の被害想定および、NBC（核、生物、化学）兵器対応の課題を調査した。

注：武力攻撃事態等及び存立危機事態における我が国の平和と独立並びに国及び国民の安全の確保に関する法律（略称：事態対処法）、武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律（略称：国民保護法）

次に、避難施設（シェルター）の状況を把握するために、国内の整備状況、海外事例、要求性能と設備、資材の備蓄、運用計画について調査した。なお、海外事例については核シェルターの事例も一部含まれている。

最後に、既存の地下施設や地下インフラの避難施設（シェルター）としての利用の可能性のある既存の施設の抽出と転用時における課題を整理した。

3.1.3 調査状況

核シェルターが備えるべき要件や日本における普及状況、課題などの情報を収集するため、現地調査としてNPO法人日本核シェルター協会を視察、ヒアリングを実施した。現地調査の状況を図3.1-1に示す。

日時：2023年10月5日（木） 14:00～16:00

場所：NPO法人日本核シェルター協会（茨城県つくば市）

出席者：NPO法人日本核シェルター協会 理事・事務局長 川嶋氏

（一財）エンジニアリング協会

第2部会

大森部会長、土屋副部会長、黒澤委員、吉丸委員、村瀬委員

中村委員、栗田委員

事務局

下山主任研究員、澤井担当部長



核シェルター内部個室見学



ショールーム見学



質疑応答風景

図3.1-1 NPO法人日本核シェルター協会の現地調査状況

3.2 調査研究のまとめ

3.2.1 武力攻撃による被害想定

国民保護法において4つの武力攻撃事態（着上陸侵攻、ゲリラや特殊部隊による攻撃、弾道ミサイル攻撃、航空攻撃）の他にNBC攻撃への対応も想定されている。NBC攻撃とは、Nuclear(核)、Biological(生物)、Chemical(化学)兵器を用いた攻撃の総称をいう。本調査研究は、攻撃の予測が難しく北朝鮮の動向など比較的脅威が高いと思われる「弾道ミサイル攻撃（通常弾頭）」と、大量破壊を伴うNBC攻撃に関する調査を行った。

(1) 通常弾頭ミサイルによる被害想定

弾道ミサイルは、大気圏の内外を放物線状に飛翔して目標地点に落下するミサイルであり、弾道ミサイル被害は弾頭の種類により被害の様相が大きく異なるため、通常弾頭を対象とした。以下に、通常弾頭ミサイルによる被害想定を示す。

- ①北朝鮮からの弾道ミサイル攻撃は、日本全土が射程圏内であり、人口密集地や産業集積地が標的になりやすい。特に、原子力発電所、電力インフラ、石油コンビナートなどは、直撃しなくても施設周辺に着弾するだけで甚大な影響を与えることが可能である。
- ②弾道ミサイル攻撃は、家屋や施設の破壊・火災などの直接的な被害の他に、「弾道ミサイルが飛来し、着弾した」という事実による政経中枢や一般社会に不安感を与える副次的な効果も考えられる。
- ③身体的な被害として、ミサイル着弾時の衝撃や爆風および破壊された建物などの破片を身体に直接受ければ、死傷する可能性が大きくなる。
- ④交通、エネルギー、通信などのインフラ機能の一時的停止が考えられる。また、着弾場所によっては、施設の破壊による復旧の長期化の可能性がある。

次に、実際の被害事例として、湾岸戦争（1991年1月）でイスラエルが受けたイラクの弾道ミサイル攻撃被害を図3.2.1-1に示す。40発着弾に対して死者2名、負傷者200名強の被害に止めている。このように被害を軽減することができた要因として、シェルター整備や有事の際の対応をイスラエル政府がイスラエル国民に周知させていたことが挙げられる¹⁾。

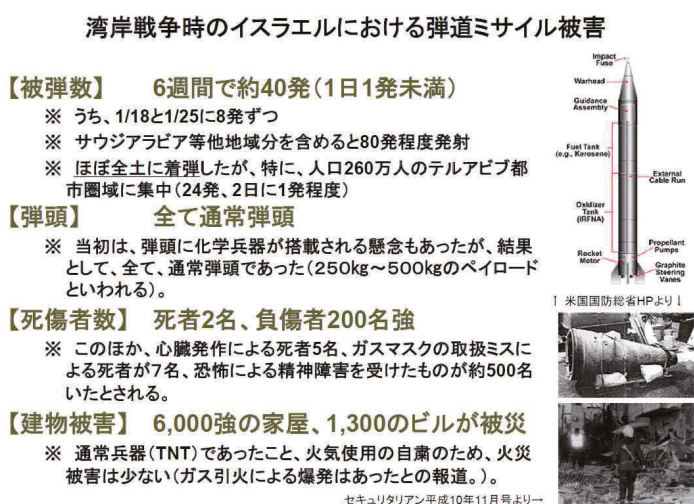


図3.2.1-1 湾岸戦争時の弾道ミサイル被害

出典：消防庁国民保護室¹⁾

(2) 核兵器による攻撃

核兵器とは、核分裂の連鎖反応または核融合反応で放出されるエネルギーを利用して、爆風、熱線、放射線の効果を破壊に用いる兵器の総称をいう。核兵器による作用は、爆風圧、熱線、初期放射線、残留放射線に区別される。核攻撃による被害は、通常、爆心を中心として広範囲かつ短時間に甚大な被害が生じることが想定される。また、高高度での核爆発によりEMP（電磁パルス）を発生させ地上の電気設備や電力インフラの破壊が現実的になっている。

核攻撃に対応する避難施設に求められる性能と設備は、爆風圧に耐える構造、熱線や放射線に対する遮蔽性能、気密性や防爆対応の換気設備、屋外からの避難者を除染する除染室および除染設備である。また、一定期間滞留するために必要な生活物資などの備蓄が必要である。EMP攻撃への対策として、電磁波を通さない材料で遮蔽・防護、過電流・過電圧の遮断装置の設置が必要である。

(3) 生物兵器による攻撃

生物兵器とは、天然痘ウイルス、ペスト菌、炭疽菌、ボツリヌス毒素などの生物剤や、これらを保有・媒介する生物を使用して、人、動物、または植物に害を加える兵器のことをいう。生物剤が使用された場合、自然発生の疾病との区別が困難であり、発症するまでの潜伏期間に感染者が移動することにより、被害が広範囲かつ長期になる可能性がある。

生物兵器に対応する避難施設に求められる性能と設備は、生物剤の侵入を防止するための気密性や、換気口や換気扇にウイルスなどの侵入を防止する高性能フィルターを装着した換気設備などが必要となる。また、使用された生物剤の種類や感染防止方法についての情報収集機能や感染者を隔離するための設備および医療設備などが必要となる。

(4) 化学兵器による攻撃

化学兵器とは、化学剤の散布や化学剤を含む爆薬の爆発により、一度に大量の人を殺傷する大量破壊兵器のことをいう。これまでに化学剤として開発された毒性化学物質には、神経剤、血液剤、窒息剤、びらん剤などがあり、いずれも呼吸器系統や神経系統の身体機能に障害を生じさせる。

化学兵器に対応する避難施設に求められる性能と設備は、化学剤の侵入を防止するための気密性と化学剤の侵入を防止できる高性能フィルターを装着した換気設備の整備、防護服・呼吸保護具などの備蓄が必要である。また、身体の表面に付着した化学物質を除去する除染室および除染設備も必要である。

3.2.2 シェルターに関する調査

(1) 国内の避難施設（シェルター）の整備状況

武力攻撃事態等に備えて、避難施設の指定が継続して行われており、避難施設の指定状況については、図3.2.2-1に示すように内閣官房の国民保護ポータルサイトで定期的に更新・公表されている。

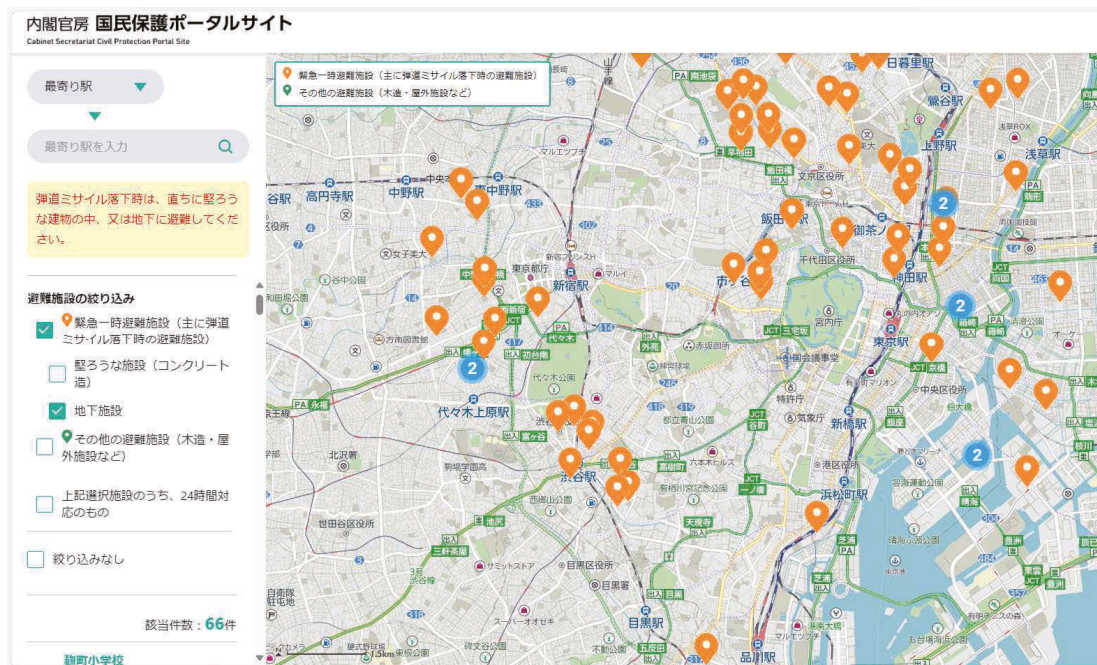


図3.2.2-1 地下施設を対象とした避難施設位置の表示例

出典：内閣官房HP²⁾

2022年4月1日時点において指定された全国の避難施設数は94,424箇所であり、人口に対するカバー率は全国で111.6%（1人あたり0.825㎡で算出）である。このうち、ミサイル攻撃による爆風などの直接的な被害軽減に有効な地下施設は1,591箇所である。なお、ここでの避難施設は、緊急的に指定したもので現時点において弾道ミサイル攻撃やゲリラや特殊部隊による攻撃、NBC攻撃等の多様な攻撃から、国民の生命および身体を完全に保護することは難しいのが現状である。しかしながら、台湾有事に備えた先島諸島での避難施設整備や、東京都営地下鉄の麻布十番駅の整備など堅牢なシェルター建設に向けた検討が開始されている。

(2) 海外の避難施設（シェルター）の整備状況

海外の避難施設（シェルター）では、スフィア基準が参照されている事例も多い。スフィア基準は、人道憲章や権利保護の原則、人道支援の必須基準、技術的な4項目（給水や衛生、食料、避難所、医療）についての最低基準の倫理的・法的な根拠が示されており、避難が長期化する場合は、スフィア基準の仕様が参考になるとされる。

海外における避難施設（シェルター）の整備状況を表3.2.2-1に示す。各国で算定方法やシェルターの定義の違いに留意する必要があるが、国際社会の緊張を背景に、中東やアジアにおいても避難施設（シェルター）の整備が進んでいることを読み取ることができる。

表3.2.2-1 各国・地域のシェルター整備状況

国名 地域名	人口比の 収容可能率	概要
台湾	300%	学校や一定規模以上のビル、マンションに設置を義務付け
韓国	170%	ソウルは住民の3.5倍分を確保。一部は政府が設置補助。義務はなし
スイス	103%	冷戦時に全新築住居に設置を義務付け。自治体が避難を割り当て
イスラエル	70～90%	国民の4割が自宅に設置。全新築住居に壁を強化した区画の設置義務
シンガポール	60%	全新築住宅に設置を義務。地下鉄シェルターは周辺人口に合わせ設計
ノルウェー	45%	95%の施設は民間事業者が整備。1998年以降は新たな建設を凍結
アメリカ	-	冷戦期に核攻撃に伴う放射性物質から身を守る施設施設の補助金があったが70年代に打ち切りに

出典：日本経済新聞³⁾ 記事の表を再構成

海外における避難施設（シェルター）について、アメリカ、イギリス、ドイツ、フランス、韓国、スイスの6ヶ国を調査した。本格的な核シェルターを除くと学校、スポーツ施設などを利用している点は、各国でほぼ共通していると思われるが、資材の備蓄において、アメリカとフランスでは一部の備品を住民が用意するなどの違いを把握できた。

また、イギリスとドイツは、地下鉄駅を核兵器に対応できるシェルターとして整備し、収容人数は、イギリスで約8,000人、ドイツのジーメンスダム駅で約4,300人である。

(3) 避難施設（シェルター）の要求性能と設備

弾道ミサイル着弾時の衝撃や爆風、破壊された建物などの破片から身体を守るために、堅牢な施設や地下施設、外気からの密閉性の高い部屋などが求められている。

設備に関しては、断水や停電への備えとして、井戸や貯水槽、非常用発電機などが必要である。特に、地下施設は、換気、排水、通信に電力を使用するため、電源確保は重要である。また、通信設備に関しては、現場の状況によって使用できない機器もあると想定されるため、表3.2.2-2に示すような複数種類の情報通信機器の準備が望ましい。

表3.2.2-2 主な情報通信機器

	利点	欠点
テレビ	<ul style="list-style-type: none"> 多くのチャンネルがあり、衛星アンテナによって外国の番組も見ることができる ポータブルテレビ、ワンセグ携帯は持ち運びできる カーナビにテレビ機能が付加されているものもある 	<ul style="list-style-type: none"> 停電になると使用できなくなる アンテナ等が損傷されると映りが悪くなる、使用できなくなる 地下施設では通常利用し難い
パソコン	<ul style="list-style-type: none"> インターネットを経由して多くの情報を入手できる。外国の情報も入手が可能 機種によって持ち運びができ、テレビを見ることができる バッテリーが内蔵されており、停電時でも数時間は使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 最低限度の操作方法を知らないで使用できない 通信回線が切断されると、情報を取得できなくなる
ラジオ	<ul style="list-style-type: none"> 多くのチャンネルがある 電池式、手回し充電式のものもあり、停電時でも使用が可能 他の機器に比べ安価 	<ul style="list-style-type: none"> 他の機器に比べ場所によって電波受信の影響を受けやすい
携帯電話	<ul style="list-style-type: none"> 多くの人が所有している バッテリーが内蔵されており、停電時、外出時でも使用可能 メール、電話と情報を受け取る種類が多く、機種によってはインターネットに接続して情報を得ることができる ワンセグ携帯はテレビの機能を有する 	<ul style="list-style-type: none"> 電波が届かないと使用できない メールは受信にタイムラグが発生することもある 一斉に使用すると輻輳する
電話等	<ul style="list-style-type: none"> ほとんどの避難施設に設置されている ファクシミリ機能をもつものもある 	<ul style="list-style-type: none"> 電波が届かないと使用できない 電話線が切断されると使用できない
防災行政無線等	<ul style="list-style-type: none"> 地方自治体からの情報を直接聞くことができる 全国瞬時警報システム（Jアラート）と接続していて警報を短時間で知らせる 非常時でも通信を確保できるように整備されており（電波法第74条）停電対策なども施されている 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内等では、場合によっては聞こえづらいこともある

出典：消防庁国民保護室⁴⁾に一部加筆

(4) 避難施設（シェルター）の資材の備蓄

必要となる備蓄品を把握するために、内閣府⁵⁾と災害備蓄品マニュアル製作委員会⁶⁾の備蓄品例をもとに、表3.2.2-3に示す避難施設（シェルター）の基本的な備蓄品目を取りまとめた。

表3.2.2-3 避難施設（シェルター）の基本的な備蓄品

項目	品目
食料品	飲料水：ミネラルウォーター、スポーツドリンクなど 主食：無洗米、アルファ米、パン、乾パンなど 高齢者向けのレトルト粥 乳児向けの粉ミルク、離乳食 副食：レトルト食品、缶詰、インスタント食品など 菓子：チョコレート、クッキー、キャンディなど ※いずれも長期保存が可能なものを選定する
生活用品	調理器具（カセットコンロ、鍋等）、食器（紙皿、紙コップ等）、生活用水（ポリタンクまたはバケツ使用）、寝具（毛布、寝袋等）、間仕切りパネル、携帯ラジオ、懐中電灯、手回し発電機、ライター、ブルーシートなど
衛生用品	救急用品（包帯、ガーゼ、絆創膏、消毒液、医薬品など）、タオル、ウェットティッシュ、石鹸、ドライシャンプー、肌着、生理用品、消臭スプレー
トイレ、ごみ用品	簡易トイレ、ポータブルトイレ、密閉型汚物入れ、紙おむつ（大人用、乳幼児用）、凝固剤、ポリ袋など

次に、避難施設の備蓄量を算定するための、収容面積と使用期間から備蓄量を求める算定式を以下に示す。なお、ここでの使用量や期間などの諸条件は目安であり、詳細検討時には、該当箇所の実情を考慮した条件を適時設定するものとする。

$$\text{備蓄量} = \text{避難者1人の1日当たりの使用量} \times \text{使用期間（日）} \times \text{想定収容人数} \quad (\text{式1})$$

$$\text{想定収容人数（人）} = \text{収容面積（m}^2\text{）} / \text{避難者1人あたりの専有面積（m}^2\text{/人）} \quad (\text{式2})$$

ここで、

避難者1人の1日当たりの使用量：飲料水3L、食事3食、生活用水20L

使用期間：自然災害で5日間、NBC攻撃で2週間

収容面積：居住スペース（共有部分は除く）

避難者一人当たりの占有面積：1.65m²（畳1畳程度）

最後に、代表的な都市の想定避難期間と総人口に対する想定避難者数の割合を分析した。避難期間は1～3日、想定避難者数の割合は5～25%であり、震災を経験している都市や南海トラフ地震などによる被害が想定される震災リスク都市において、割合が高い傾向が認められる（表3.2.2-4）。

表3.2.2-4 都市における資材備蓄量の想定避難者数と期間

都市名	人口(A) 2023.12現在	想定避難者数 (B)	想定避難 期間	対人口比 (B/A)%
札幌市	約196.9万人	約9.0万人	2日	約4.6%
新潟市	約76.8万人	約17.7万人	—	約23.0%
さいたま市	約134.5万人	約12.3万人	1.5日	約9.1%
大阪市	約277.3万人	約52.9万人	3日	約19.1%
岡山市	約71.6万人	約11.6万人	3日	約16.2%
松山市	約50.2万人	約8.9万人	—	約17.7%
鹿児島市	約59.5万人	約3.8万人	1日	約6.4%

(5) 避難施設（シェルター）の運用計画

国民の生命財産の保護、市民生活や経済に対する影響の最小化、有事の際の避難、救援、武力攻撃災害への対処を的確に実施するために、国は基本方針を、地方公共団体は国民保護計画をそれぞれ作成している。図3.2.2-2に福岡県の国民保護計画の構成を示す。国民保護計画では、平素における備えや有事における指揮体制、避難誘導、救援、武力攻撃への対処、沈静化後の復旧などが計画されている。

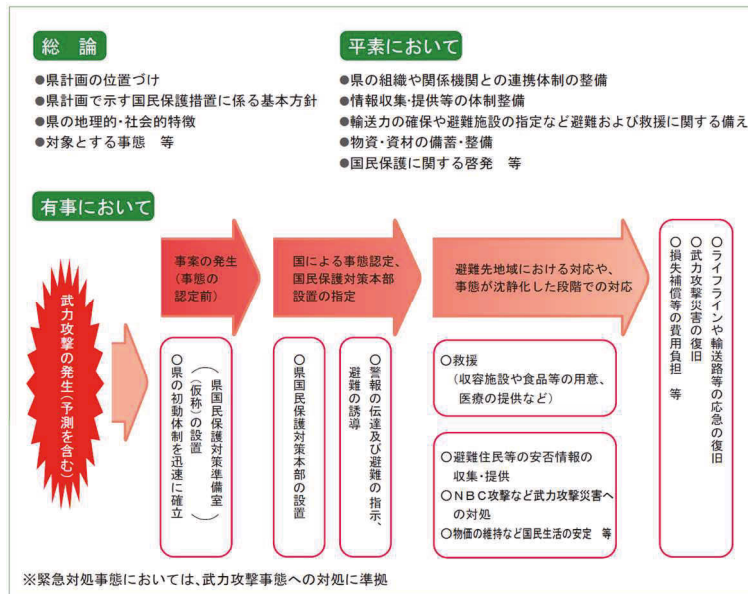


図3.2.2-2 福岡県の国民保護計画の構成

出典：福岡県防災HP⁷⁾

3.2.3 既存地下インフラのシェルターとしての利用可能性

(1) 避難施設の概要と既存地下インフラの抽出方針

国民保護法に基づく避難施設・緊急一時避難施設の指定にあたっては、都市部に限らず地下施設などを避難施設に指定するよう配慮することなどが示されたため、今後は緊急一時避難施設の指定が一層進められるだけでなく、地下駅舎・地下街・地下道などの地下施設が特に重要な避難施設として位置付けられることとなった。

また、緊急一時避難施設は、コンクリート造りなどの堅牢な建築物や地下街、地下駅舎などの地下施設を指定することとされており、堅牢な地下施設と解釈可能な既存地下インフラは、概ね「緊急一時避難施設」の定義を満足しているものと考えられる。

これまでに指定された大規模な緊急一時避難施設は、主に政令指定都市に整備されたものであり、地方における様々な既存地下インフラも対象に広げ、検討・選定する必要がある。また、緊急一時避難施設として求められる避難期間としては、数時間だけでなく、自然災害からの避難を念頭とした約3日間や、核攻撃避難を想定した最大2週間程度を目安として、既存地下インフラの抽出と利用可能性の検討を行った。

(2) 既存地下インフラの抽出

既存地下インフラとして、地下駐車場、道路トンネル、地下横断歩道、共同溝、雨水貯留施設、ビルの地下ピットを抽出した。

1) 地下駐車場

道路・公園・広場などの公共施設、商業ビルなどの民間施設の地下に整備された地下駐車場や地下歩道（図3.2.3-1）は、東京や政令指定都市などの大都市部に限らず、県庁所在市など主要地方都市でも整備されており、一定の規模と収容能力を備

えているほか、トイレなどの給排水設備や排気・消火設備、電気設備などが整っていることが利点である。

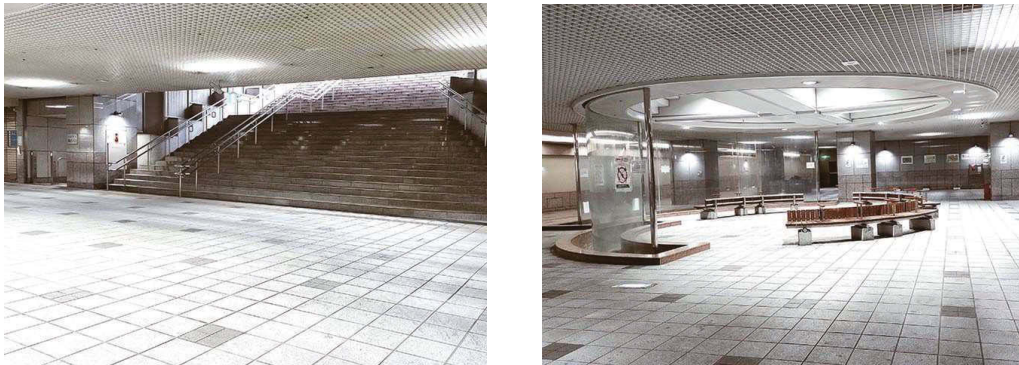


図3.2.3-1 松山市役所前地下駐車場（地下広場部分）

出典：全国ロケーションデータベースHP⁸⁾

2) 道路トンネル

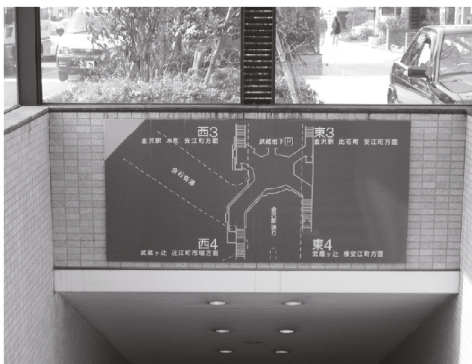
都市部における道路トンネルの代表例として、首都高速道路の中央環状線「山手トンネル」、阪神高速道路の淀川左岸線「正蓮寺川トンネル」などが挙げられる。

このような道路トンネルは、一般的には2車線以上の幅員が確保され、換気設備が整い、車も人も十分な収容力を持つほか、土被り厚が大きい傾向もあることから、対爆防御性は高いと考えられる。また、車両走行専用の設備であるなどの課題があるものの、法改正や運用の見直し、電気自動車普及によるトンネル換気設備の縮小などに応じた余剰空間の常時一般供用化、避難通路内への備蓄設備の設置など、様々な活用方法が挙げられる。

3) 地下横断歩道(大規模地下歩行空間を除く地下道)

比較的小規模な地下横断歩道（図3.2.3-2）は、都市の規模に関わらず、全国各地の交通量の多い幹線道路や主要交差点に整備されており、地方における貴重な緊急一時避難施設の候補となり得る。実際に、一部の自治体で地下横断歩道を緊急一時避難施設に指定した事例があり、今後の普及促進や周知徹底が望まれる。

●わかりやすい誘導



●歩道の残存幅員確保



図3.2.3-2 石川県における地下横断歩道整備事例(金沢市武蔵西横断地下道)

出典：石川県HP⁹⁾

4) 共同溝

全国各地に整備された共同溝のうち、主要国道や広幅員の道路の地下に整備され、比較的大きなスペースが確保されている幹線系の共同溝が緊急一時避難施設として想定される。中心市街地で整備された共同溝は、一刻を争う緊急事態において、人々が飛び込むことのできる貴重な空間であると考えられる。

共同溝の緊急一時避難施設としての活用にあたっては、緊急時の入出口の管理や開放措置などに関する法整備や運用方法の検討が必要となる。

5) ビルの地階・地下ピット

一般的なビルの地階・地下ピットには、トイレ排水を貯留する排水槽や、洗面器などからの雑排水を貯留する雑排水槽、浸透してきた湧水を貯留する湧水槽などが整備されており、ビルの大小に関わらず整備されているため、対爆・対攻撃時の緊急一時避難に活用しうるほか、湧水は非常時のトイレ洗浄水としての活用も可能な場合があるため、活用可能な既存地下インフラであると考えられる。

6) 雨水貯留施設

雨水貯留施設は市街地の浸水を防止するために地下に整備された大型の貯留槽であり、主に大都市部で整備されている。このような雨水貯留施設（図3.2.3-3）は、豪雨・洪水などの非常時を除外すれば、巨大な地下空間となっているため、人口集中地区における既存地下インフラ活用として、緊急一時避難施設への指定が望まれる。

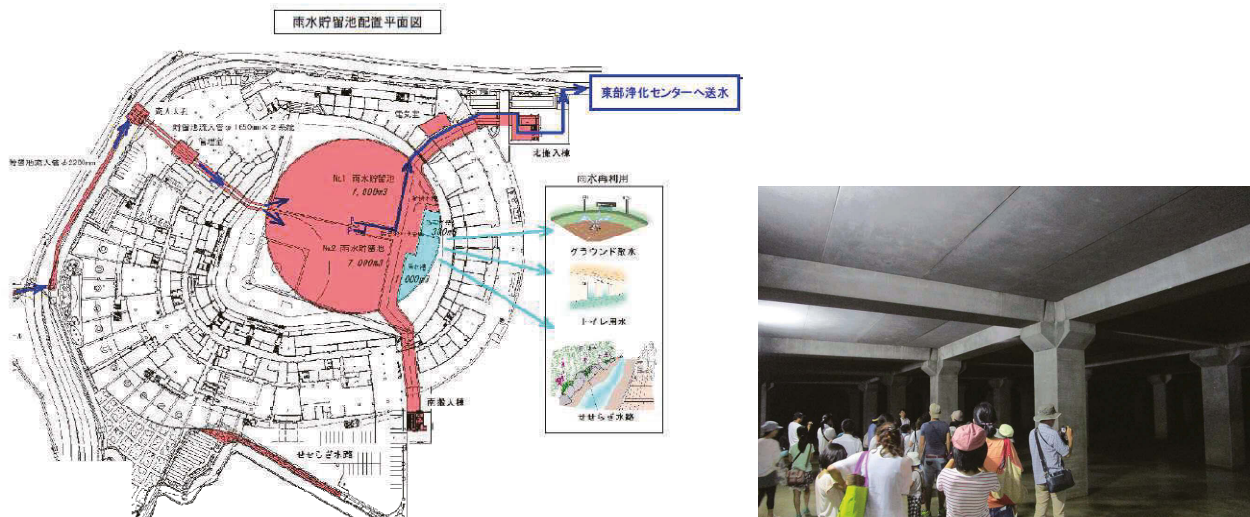


図3.2.3-3 大州雨水貯留池の平面図(左)および内部(右)

出典：広島市下水道局HP¹⁰⁾、国土交通省インフラツーリズム魅力倍増プロジェクトHP¹¹⁾

3.3 今後の課題

既存地下インフラの避難施設（シェルター）としての利用上の課題について、設備面、備蓄面、想定する災害、緊急一時避難施設の指定・普及、大都市圏と地方圏の違い、ソフト面の観点で課題抽出した。

(1) 設備面の課題

緊急一時避難施設で想定される数時間程度の避難期間ではなく、3日程度の避難期間の場合は、既存地下インフラの電気・給排水・衛生環境などの諸設備の追加や改良の必要性が高くなるとともに、設備稼働用の電源確保について非常用発電機（図3.3-1）が必要である。

既存地下インフラは自然採光が困難であるため、照明機器が機能しない場合は暗闇となることから非常用発電機は重要な設備となる。

また、武力攻撃などに関する正確かつ迅速な情報伝達が必要であり、デジタルサイネージを設置するなど、緊急一時避難施設に情報収集機能や情報伝達機能の整備が求められる。



図3.3-1 非常用発電機の設置例

出典：国土交通省HP¹²⁾

(2) 備蓄面の課題

3日程度の避難期間を対象とする場合、既存地下インフラに備蓄面での課題が生じるものと推察される。数時間後でニーズが高まる簡易トイレの備蓄は重要である。また、水や食料など自然災害用に準備している備蓄を転用することとなり、備蓄の補充や補充サイクルの短縮などによる施設運営上の課題やコスト面での課題も生じるものと推察される。

地下駅舎や地下街、地下駐車場などの既存地下インフラは、建設段階に備蓄スペースを想定していない可能性があることに留意が必要である。

NBC攻撃を想定する避難施設では、避難期間が2週間程度となり、備蓄量そのものを大幅に増加させる必要に加え、備蓄スペースの確保などの追加の課題が生じることとなる。

(3) 想定する災害レベルに応じた課題

既存地下インフラは通常利用時の利便性確保の観点や換気確保の観点、火災などの非常時の迅速な避難の観点といった複数の観点に基づき、多数の出入口が設置されており、気密性の確保が困難な施設が多いものと推察される。

NBC兵器に対する既存インフラの活用では、既存地下インフラに爆風圧や熱線・放射線への対応が求められ、気密性も求められることから、既存地下インフラの改良・改造が必要となる可能性が高い。既存地下インフラの改良・改善にはコストが必要となり、コスト負担への理解やコスト負担の分担などの課題がある。

また、NBC兵器に対応可能な既存インフラとするためには、改良・改善の具体的仕様の設定が必要であり、我が国では諸外国に比べて仕様設定が遅れている点も課題である。

(4) 緊急一時避難施設の指定・普及における課題

緊急一時避難施設の指定に際しては、対象地下インフラの施設管理者の理解と協力が必要となる。NBC兵器による武力攻撃の場合は数日間から2週間の避難期間となり、設備面や備蓄面の課題が顕在化し、施設管理者の理解と協力が得られない場合が想定される。

(5) 大都市圏と地方圏の違いにおける課題

多くの地方市区町村には地下街や地下駅舎は整備されていない現状があることから、大都市圏と地方圏の違いに配慮し、地方圏において緊急一時避難施設の指定を進める必要性がある。

(6) ソフト面における課題

既存地下インフラは各種法令（表3.3-1）に基づき整備されており、既存地下インフラに適用されている既存法規と国民保護法との整合の確保といった法整備上の課題が想定される。

表3.3-1 各構造物に関する主な法令と基準類

1	建築基準関係	建築基準法	国土交通省
		建築基準法施行令	国土交通省
		国土交通省告示	国土交通省
		建築設備耐震設計・施工指針	(一財)日本建築センター
		機械設備工事共通仕様書	国土交通省
2	消防関係	消防法	総務省
3	道路トンネル関係	道路法、同施行法、同施行令、同施行規則	国土交通省
		道路構造令、同施行規則	国土交通省
		道路トンネル技術基準	国土交通省
		道路トンネル非常用施設設置基準	国土交通省
		トンネル標準示方書	(公社)土木学会
		道路トンネル維持管理便覧	(公社)日本道路協会
		沈埋トンネル技術マニュアル	(一財)沿岸開発技術研究センター
4	鉄道関係	鉄道営業法	国土交通省
		国土交通省令	国土交通省
		国土交通省告示	国土交通省
		鉄道構造物等設計標準・同解説	(公財)鉄道総合技術研究所
5	共同溝関係	共同溝の整備等に関する特別措置法、同施行令、同施行規則	国土交通省
		共同溝設計指針	(公社)日本道路協会
6	上下水道関係	水道施設耐震工法指針・同解説	(公社)日本水道協会
		水道維持管理指針・解説	(公社)日本水道協会
		下水道施設の耐震対策指針と解説	(公社)日本下水道協会
		下水道の地震耐震マニュアル	(公社)日本下水道協会
7	設備関係	設備耐震設計委員会報告建築設備耐震設計指針(案)	(公社)空気調和・衛生工学会
		建築電気設備の耐震設計・施工マニュアル	(一社)日本電設工業会
		配電盤、制御盤の耐震設計指針	(一社)日本電機工業会
		自家用発電設備耐震設計のガイドライン	(一社)日本内燃力発電設備協会
		昇降機技術基準の解説 (付エレベーター耐震・設計施工指針)	(一財)日本建築設備・昇降機センター (一社)日本エレベーター協会
		ガス配管耐震設計マニュアル	(一社)日本ガス協会

出典：土木学会HP¹³⁾に一部加筆

弾道ミサイル情報などを全国瞬時警報システム（Jアラート）により地域住民に情報伝達することとしているが、攻撃目標を特定することが困難であることや、極めて短時間で我が国に弾道ミサイルが着弾することに対応する必要があり、弾道ミサイル攻撃に対する避難訓練や救護訓練といったソフト面での対応や周知活動（図3.3-2）が重要である。

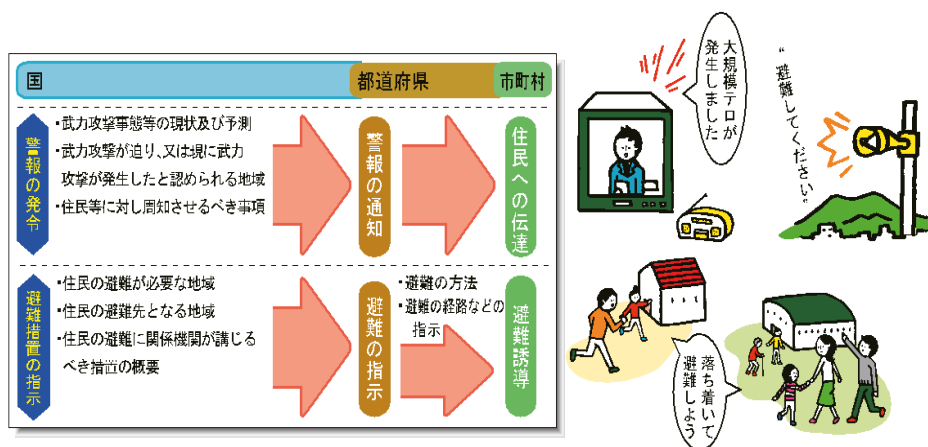


図3.3-2 福岡県での周知事例（警報の発令と避難措置の指示）

出典：福岡県防災HP⁷⁾

【参考文献】

- 1) 消防庁国民保護室：国民保護における避難施設の機能に関する検討会報告書，
2008年（参照 2023.11）
https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento250_01_200703-2houdou_z.pdf
- 2) 内閣官房HP：国民保護ポータルサイト（参照2023.11）
<https://www.kokuminhogo.go.jp/hinan/index.html>
- 3) 日本経済新聞：「人命守るシェルター、普及への支援策は？」,2023.1.27
（参照2023.11）
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODL26C4L0W3A120C2000000/>
- 4) 消防庁国民保護室：国民保護における避難施設の機能に関する検討会報告書，
平成20年7月
- 5) 内閣府：広報誌「ぼうさい」平成22年9月号(第59号)(2010)（参照2023.11）
<https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h22/09/pdf/bs1009.pdf>
- 6) 災害備蓄品マニュアル制作委員会：防災備蓄品マニュアル（参照2023.11）
<https://home.bohsai.info/index.html>
- 7) 福岡県防災HP：「国民保護」ってなに？（参照2023.11）
<https://www.bousai.pref.fukuoka.jp/files/uploads/nani-all.pdf>
- 8) 全国ロケーションデータベースHP：松山市役所前地下通路広場（参照2023.11）
<https://jl-db.nfaj.go.jp/location/380100096/>
- 9) 石川県HP：バリアフリー社会の推進に関する条例「施設整備の手引き」
（参照2023.11）
<https://www.pref.ishikawa.lg.jp/kenju/bf-tebiki/documents/0403.pdf>
- 10) 広島市下水道局HP：大州雨水貯留池パンフレット（参照2023.11）
<https://www.city.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/13559.pdf>
- 11) 国土交通省インフラツーリズム魅力倍増プロジェクトHP：大州雨水貯留池
（参照2023.11）
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/infratourism/infralist/hiroshima/index02.html>
- 12) 国土交通省 HP：地下街の安心避難対策ガイドライン(改訂版) 令和2年3月,(参照 2023.11)
<https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001365723.pdf>
- 13) 土木学会HP：トンネル耐震設計の方向と基本課題(第Ⅱ編)，土木学会地震工学委員会
トンネル耐震性研究小委員会,1998（参照2024.2）
<https://www.jsce.or.jp/library/eq10/book/46253/0009.pdf>

4. 人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築に関する調査研究

4.1 調査経緯・調査方法

4.1.1 調査方針

本研究においては、将来の人流・物流の特性変化に対応する新たな地下インフラ構築および既設インフラの転用の可能性について調査を行うものとする。

すなわち、現在の国土インフラの基盤となった高度経済成長時代とは異なり、気候変動をはじめとする自然環境や社会構造の急激な変化が予想される近未来においては、国土のインフラの量・質ともに、大きく変化するものと考えられる。したがって、道路や鉄道をはじめとする国土基盤を新たに整備していく時代のインフラ整備とは異なる考え方が必要である。具体的には、緻密な将来予測のもとに、既存インフラを効果的に活用しつつ社会の変化にも柔軟な対応が可能となる革新的な技術開発により、変化に対応するインフラを効率的に整備していくことが必要であると考えられる。

上記のような背景を念頭に置き、本研究では将来の社会を予測したうえで、その予測結果に基づいて、あるべき人流および物流の姿を描くこととしたい。こうした中で、地下インフラ構築について考察を行うこととなるが、昨年度までの研究¹⁾においても示したように、大都市圏においては地上・地下の一体型開発が数多くなされており、この流れは今後もさらに加速するものと考えられる。このため、本研究では、地下インフラに焦点を当てながらも、それと連続する地上や水上・空中のインフラについても言及するものとする。なお、対象とする地域としては、地下空間の活用が必要とされる大都市域を中心とするものとする。

4.1.2 調査内容

本研究では、将来の社会の在り方をできるだけ的確に予測し、その社会の実態に即した検討をすることが必要である。このためには、検討の対象とする将来について、ある程度明確にしておく必要があるものと考えられる。このとき、あまりに近未来では現在の社会構造との差異は見えにくくなり、逆に 50 年以上先については、予測の精度が大幅に下がる恐れがある。こうしたことから、ここでは、ある程度の精度での予測が可能であり、なおかつ現在の社会構造とは明確な変化が見込まれる時期として、約 25~30 年後の 2050 年をターゲットとして検討を行うこととした。

検討の方法としては、第一段階としては上記の 2050 年の日本社会について、できるだけ明確に予測することとし、次に、第二段階としてそうした社会において要求されるインフラの機能を明確にしたうえで、現在の都市機能を構成する様々な地下インフラの活用可能性について検討を行うこととする。

4.1.3 調査状況

今年度は、研究の第一段階として、地球温暖化など人間の生活環境に大きな影響を与える自然環境の変化、人口や産業構造や生活スタイルの変化など基礎的な将来予測を行うと

同時に、社会構造の変化にも大きな影響を与える技術革新の動向を調査する。具体的には、様々なデータに基づいて予測された未来社会の状況を、主に公的な機関による資料をもとに整理し、こうした検討結果を受けて、人の動きや交通体系の変化と、物流のシステムや量的な変化などを予測した。これらの検討結果を受けて、将来の都市域の地下インフラの持つ課題を抽出し、来年度の課題へとつなげていきたい。

なお、今年度の現地調査は、未来社会を支えるエネルギーのうち、CO₂削減に寄与する技術を視察する目的で、以下のように実施した。以下の報告内容は GEC ニュースに掲載したものを引用したものである。

日程：2023年12月6日（火）～7日（水）

訪問先：①12月6日：福島県いわき市 勿来 IGCC パワー合同会社

②12月7日：福島県双葉郡浪江町（なみえ水素タウン）

(1) 石炭ガス化複合発電（IGCC）

石炭ガス化複合発電（IGCC）は、ガス化炉内で石炭をガス化し、この石炭ガスをガスタービンに導き燃焼させることにより、ガスタービンを回転させ発電し、さらにガスタービンに残った高温の排気ガスをボイラーに導いて、その熱で蒸気を発生させ蒸気タービンを回転させ発電するものである。こうすることにより、IGCCは熱効率が向上することで使用燃料を節約することが可能で、CO₂排出量を低減させることができる（図4.1.3-1）。

勿来 IGCC パワー合同会社は2016年に設立され、2021年より営業運転を開始している。現地では、敷地内においてIGCCの各設備の説明をしていただき、また、タービン建屋、中央操作室なども見学することができた。その後、同社の堀江所長をはじめとする関係者の皆さんと活発な意見交換を行って、石炭火力発電の可能性について知見を得た。現地での見学状況を図4.1.3-2に示した。

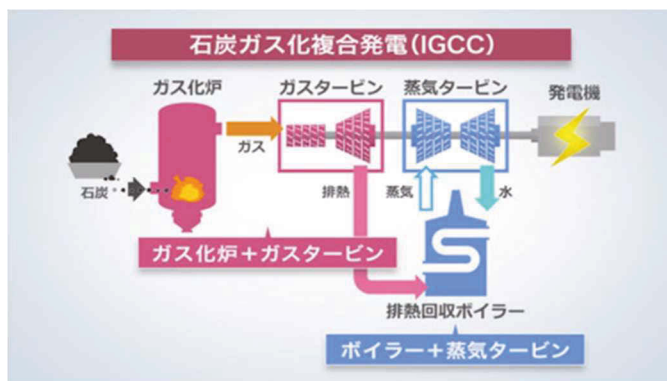


図 4.1.3-1 石炭ガス化複合発電の仕組み



図 4.1.3-2 勿来 IGCC 正面玄関

出典：勿来 IGCC パワー合同会社 HP²⁾

(2) なみえ水素タウン構想

福島県双葉郡浪江町は、町内に立地した福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R）産水素を積極的に活用して水素の「つくる」「はこぶ」「つかう」という各フェーズにおける課題の整理・解決を目指して、町を水素実証フィールドとして活用している（図

4.1.3-3)。このPDCAを繰り返すことにより、水素社会実現に寄与したいとの思いで水素利用を推進している。

部会メンバーが宿泊した「福島いこいの村なみえ」では、施設内にある純水素燃料電池からの熱を利用した大浴場が設けられ、「水素の湯」として地元の方にも広く利用されている。また、宿泊施設のコテージも、東日本大震災時の避難施設を再利用しているなど、東日本大震災の復興に向けて数多くの取組みがなされている。

現地調査では、浪江町産業振興課新エネルギー推進係の赤井副主査より、広大な土地に広がる太陽光パネル群から作られる水素が浪江町の各所に運ばれ、利用されていることを説明していただいた。具体的には、水素トレーラから発電設備（純水素燃料電池）への柱上パイプラインや既存の電柱を使用しての敷設の状況や、簡易水素充填設備からの水素燃料電池自動車への充填設備の取り扱いなど、当初の予想より簡便な施設により、町の交通機関として水素が広く活用されている実態を見学することができた。浪江市役所にある簡易水素ステーションでの見学状況を図4.1.3-4に示す。

また、浪江町では、居住人口約2,000人に対して、約80台の水素燃料電池自動車が実際に活用されており、行政だけでなく一般の人の水素利用も広がっていることを実感することができた。



図 4.1.3-3 なみえ水素タウン構想

出典：浪江町における水素利活用の取組み³⁾



図 4.1.3-4 浪江町役場前

水素ステーション

今回調査した二つの施設は、いずれも研究開発用ではなく、実運用されているものであり、こうした社会実装に向けた取組みが全国的に展開されることで、ゼロカーボン社会の実現に近づいて行くものと考えられる。

4.2 調査研究のまとめ

今年度の調査結果については、最初に地球規模での変化が、より科学的に予測されている気候変動について整理する。合わせて、公的な機関により統計的に高い確度をもって予測されている人口動態について整理したものを、2050年における日本の置かれた基本的な状況とする。

一方、今後顕在化していくものと考えられている、より強力な温暖化対策や生産人口の減少に対するための技術革新の方向性を整理し、そうした技術により実現すると予想される人流ならびに物流の姿を明確にしたい。

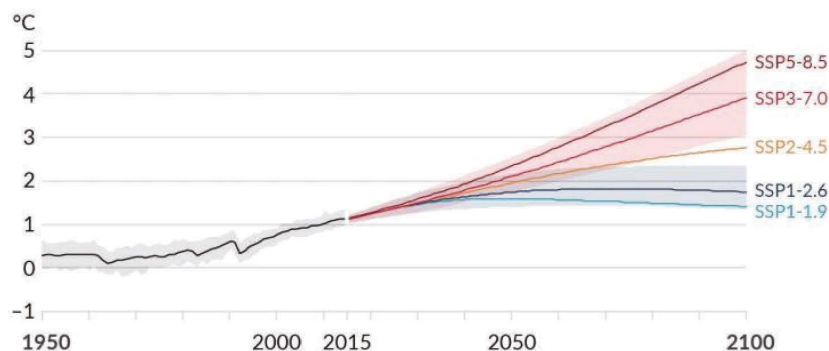
以下、それぞれの項目における未来予測の変化について整理する。

4.2.1 自然環境（気候変動）変化

近年の地球温暖化の進行によって、世界の平均気温は、19世紀半ばの工業化以前から約1℃高くなるなど、紀元後2,000年間で経験したことのない速度で上昇している。そして、この気候変動に伴い、世界中で気象災害の激甚化・頻発化が報告されている⁴⁾。

他方、この気候変動の要因について、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、人間の活動による温室効果ガス（GHG）の影響が大気、海洋および陸域を温暖化させてきたことに疑う余地はないと指摘し、このままの状況が続いた場合には、さらなる気温上昇と共に、強雨の発生頻度の増加・海面水位の上昇・台風強度の強まりなど、気象災害リスクの高まりを警告している。

今後の気候変動の予測について、IPCC AR6⁴⁾では、5つの例示的なGHG排出のシナリオにおける世界平均気温の変化が評価されている（図4.2.1-1⁵⁾）。工業化以前（1850年～1900年）と比較した場合、2030年頃ほどのシナリオにおいても、気温が1.5℃上昇し、2050年頃には、GHG排出が最も少ないシナリオ（SSP1-1.9）で1.6℃、GHG排出が最も多いシナリオ（SSP5-8.5）で2.4℃の気温上昇を予測している。



- ・ SSP1-1.9：GHG 排出が非常に少ないシナリオ（CO₂ 排出が 2050 年に正味ゼロになりその後負になるシナリオ）
- ・ SSP1-2.6：GHG 排出が少ないシナリオ（CO₂ 排出が 2075 年に正味ゼロになりその後負になるシナリオ）
- ・ SSP2-4.5：GHG 排出が中程度のシナリオ（CO₂ 排出が 2050 年まで現在の水準で推移するシナリオ）
- ・ SSP5-8.5：GHG 排出が多いシナリオ（2050 年に CO₂ 排出量が現在の 2 倍になるシナリオ）

図 4.2.1-1 5つのシナリオにおける世界平均気温の予測（1850年～1900年基準）

出典：気象庁 HP⁵⁾

また、台風・サイクロンや豪雨による洪水被害、異常高温による干ばつ・森林火災による被害が全世界で生じており、特に 2021 年は世界各地で異常な高温が発生し、南アジアおよびその周辺では、5 月～11 月の大雨により合計で 2,200 人以上が死亡するなどの甚大な被害が発生した。また、ドイツおよびベルギー周辺では、7 月中旬の大雨により 240 人以上が死亡、417 億米ドルにのぼる経済被害が発生したと伝えられた（図 4.1.2-3）⁶⁾。

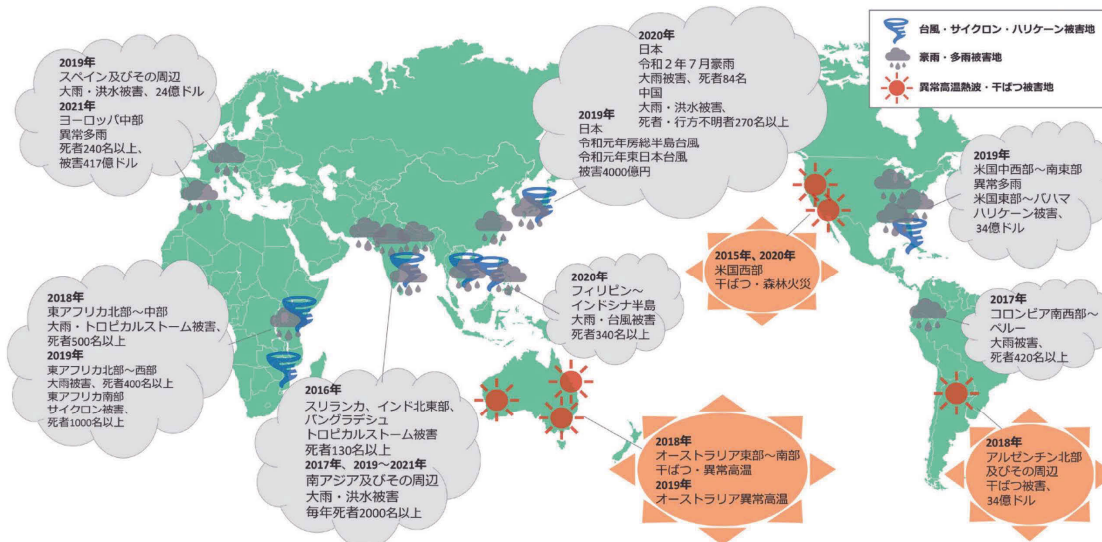


図 4.2.1-2 世界の主な異常気象・気象災害(2015年～2021年) 出典：国土交通省 HP⁶⁾

このような状況下、気候変動による気象災害リスクに的確に対応していくため、2015年に採択されたパリ協定では、世界共通の長期目標として、気温上昇 2.0°C 目標を設定し、かつ 1.5°C に抑える努力を追求することが掲げられた。そして、GHG 排出量の削減に向け、150 か国以上（2021 年 11 月時点）が 2050 年までのカーボンニュートラル実現を表明している。

我が国においても、2050 年のカーボンニュートラル実現を目指して、脱炭素化に向けた GHG 削減の取組みを推進しており、その中でも、住まい・交通・まちづくりなどの国土交通分野における取組みは、我が国全体の GHG 排出量の動向に大きく寄与するものである。

そのため、交通・物流分野においても、公共交通の利活用やモーダルシフトなどの総合的な取組みが求められており、2050 年における交通・物流分野は、気候変動の緩和策となるカーボンニュートラルにより大きく変革していることが予想される。

4.2.2 人口および人口動態の変化

日本の人口は 1967 年に 1 億人を突破し、2008 年には 1 億 2808 万人とピークに達したが、その後減少が続き、2050 年には約 1 億人まで減少するものと予想されている。これに合わせて、少子高齢化も引き続き進むことが見込まれ、2050 年頃には、100 歳以上の高齢者が 50 万人を超え、逆に生産年齢人口比率の減少が加速する。こうした傾向が続けば、2070 年には総人口が 9,000 万人を割り込み、高齢化率は 39% の水準になると推計されている。このように、今後 50 年間は、人口減少と超高齢化社会が同時かつ急速に進行する

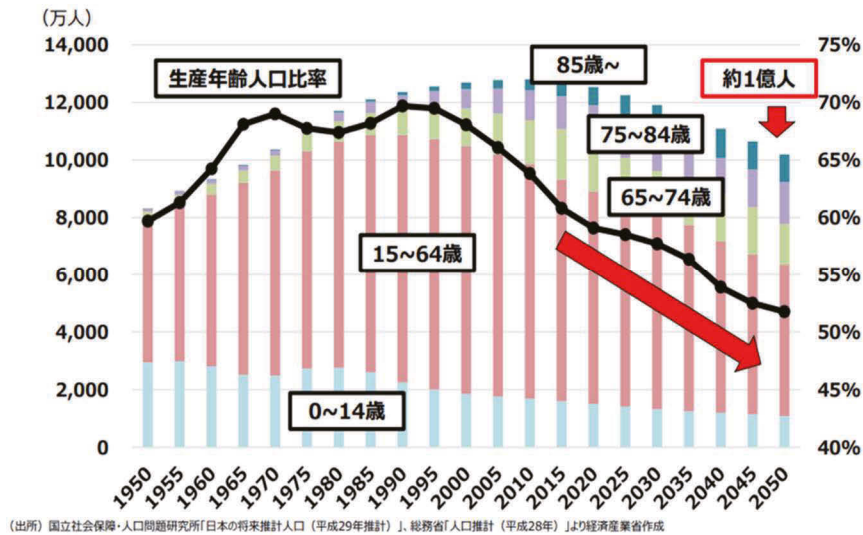


図 4.2.2-1 日本の人口推移

出展：経済産業省「2050年までの経済社会の構造変化と政策課題について」⁷⁾

ものと見込まれている⁸⁾。1950年～2050年の人口推移の実績と予想について、図 4.2.2-1 に示した⁷⁾。一方、世界の人口は2030年に約85億人、2050年には97億人に増加し、2080年代中に104億人とピークに達して、2100年まではそのレベルに留まるとされている。このように、世界全体では人口が増大する中で、むしろ先進国の人口は減少傾向にあり、日本は主要国の中で特に低い水準にある⁷⁾。

このように、今後2050年に向けて、世界全体では人口が大幅に増加する中で、日本の人口は減少が続き、現在でも問題となっている少子高齢化が一層進行するものと想定される。こうした背景において、労働力の減少に対して海外より労働者を迎え入れる政策も検討されているが、現状では上記の問題を解決できる規模での外国人労働者受け入れに関する明確な方策が示されていない。このことから、以降の検討においては、前述のような人口の推移を前提として議論を進めることとする。

図 4.2.2-2 は2050～60年における人口および生産性の変化に応じた実質 GDP の予測結果である。この図から、生産性の向上効果は人口変動以上に実質 GDP に与える影響が大きいことがわかる。

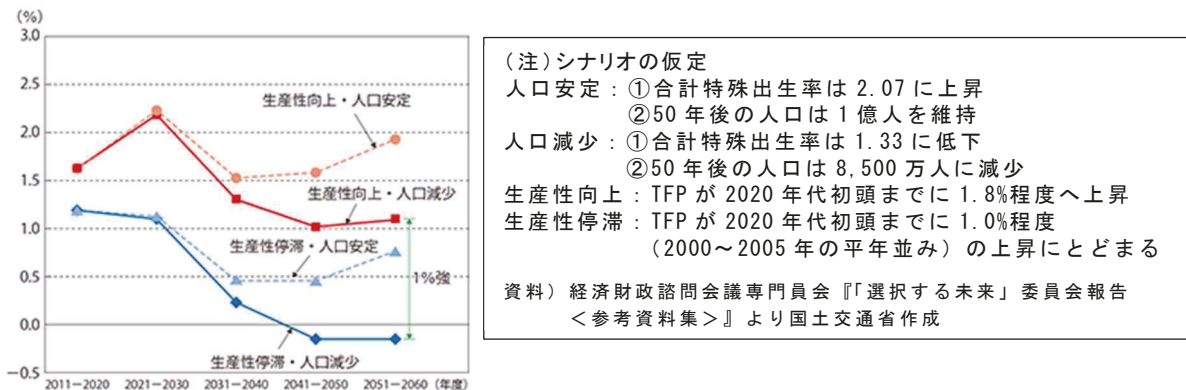


図 4.2.2-2 将来の人口と実質 GDP の推移

出展：国土交通省 HP⁹⁾

一方、昭和時代以降、我が国では夫婦と子供二人の四人家族が世帯の標準モデルとされてきたが、実際には、2015年の段階でも単身世帯が35%を占めるに至っている。世帯数自体は、その後2030年頃まで増加を続けた後に減少に転じると考えられるが、全世帯数における単身世帯の比率は、ほぼ線形的に上昇し、2040年にはおよそ40%まで拡大して、最大の世帯類型になるものと考えられる⁸⁾など、社会の基本単位である世帯構成も大きく変化していくことが予想されている。

以上述べてきたように、人口減少、とりわけ生産人口の減少やそれに伴う産業構造の変化に対しては、税制、年金、社会保障などに加えて、労働環境や働き甲斐の問題など、極めて多岐にわたる政策課題を含めた検討が必要であるが、本報告においては、社会課題を解決するために有効であると考えられる技術に注目して検討を進めることとする。

4.2.3 国土インフラの変化

未来の国土インフラの変化を考えるにあたり、国土の将来ビジョンについて調査を行った。国の施策としては、2023年7月に新たな「国土形成計画」¹⁰⁾が約8年ぶりに策定され閣議決定されており、2050年と、さらにその先の長期を見据えつつ、今後概ね10年間を計画期間として、総合的かつ長期的な国土づくりの方向性を定めている。

同計画では、前述したような未曾有の人口減少、少子高齢化の加速、巨大災害リスクの切迫、気候危機の深刻化、生物多様性の損失など、我が国が直面するリスクと構造的な変化が強く認識され、「時代の重大な岐路に立つ国土」と表現されている。こうした中で、目指す国土の姿や国土構造の基本構想が示されている。この中では、国土全体にわたって新時代を拓く地域力を結集し、未来へとつなぐ、「新時代に地域力をつなぐ国土」の形成を通じて、地方に活力を取り戻し、安全・安心で、個性豊かな地域を全国に広げ、未来を担う若者世代を含めて人々を惹きつける地方の魅力を高めて、地方への人の流れを創出・拡大することにより、地方の人口減少・流出の流れを変え、国土の多様性（ダイバーシティ）、包摂性（インクルージョン）、持続性（サステナビリティ）、強靱性（レジリエンス）の向上につなげ、未来に希望を持てる持続可能な国土を目指すとしている。表4.2.3-1に国土づくりの基本的方向性および戦略的視点に合わせて重点テーマをまとめて示した。

この計画においては、「新時代に地域力をつなぐ国土」の形成に向けた国土構造の基本構想として、国土全体にわたって、広域レベルでは人口や諸機能が分散的に配置されることを目指しつつ、各地域において重層的に各種サービス機能の多様な集約拠点の形成とそのネットワーク化を図る「シームレスな拠点連結型国土」の構築が掲げられている。具体的には、質の高い交通やデジタルのネットワーク強化を通じ、国土全体におけるシームレスな連結を強化して、日本海側と太平洋側の二面を効果的に活用しつつ、内陸部を含めた連結を図る「全国的な回廊ネットワーク」の形成を図る。これにより、活発にヒト・モノが流動し、イノベーションが促進されるとともに、災害時のリダンダンシーを確保することなどにより、広域的な機能の分散と連結の強化を図る。加えて、日常的な生活のレベルにおいても、新たな発想からの地域マネジメントの構築を通じて、持続可能な生活圏の再構築を図ることとしている。本計画の概念を図4.2.3-1に示した。

表 4.2.3-1 国土づくりの基本的方向性・戦略的視点・重点テーマ

国土づくりの基本的方向性	デジタルとリアルな融合による活力ある国土づくり
	巨大災害、気候危機、緊迫化する国際情勢に対応する安全・安心な国土づくり
	世界に誇る美しい自然と多彩な文化を育む個性豊かな国土づくり
国土づくりの戦略的視点	民の力を最大限発揮する官民連携
	デジタルの徹底活用
	生活者・利用者の利便の最適化
	縦割りの打破（分野の垣根を越える横串の発想）
国土の刷新に向けた重点テーマ	デジタルとリアルが融合した地域生活圏の形成
	持続可能な産業への構造転換
	グリーン国土の創造
	人口減少下の国土利用・管理

「シームレスな拠点連結型国土」の構築に向けた全国的な回廊ネットワークの形成

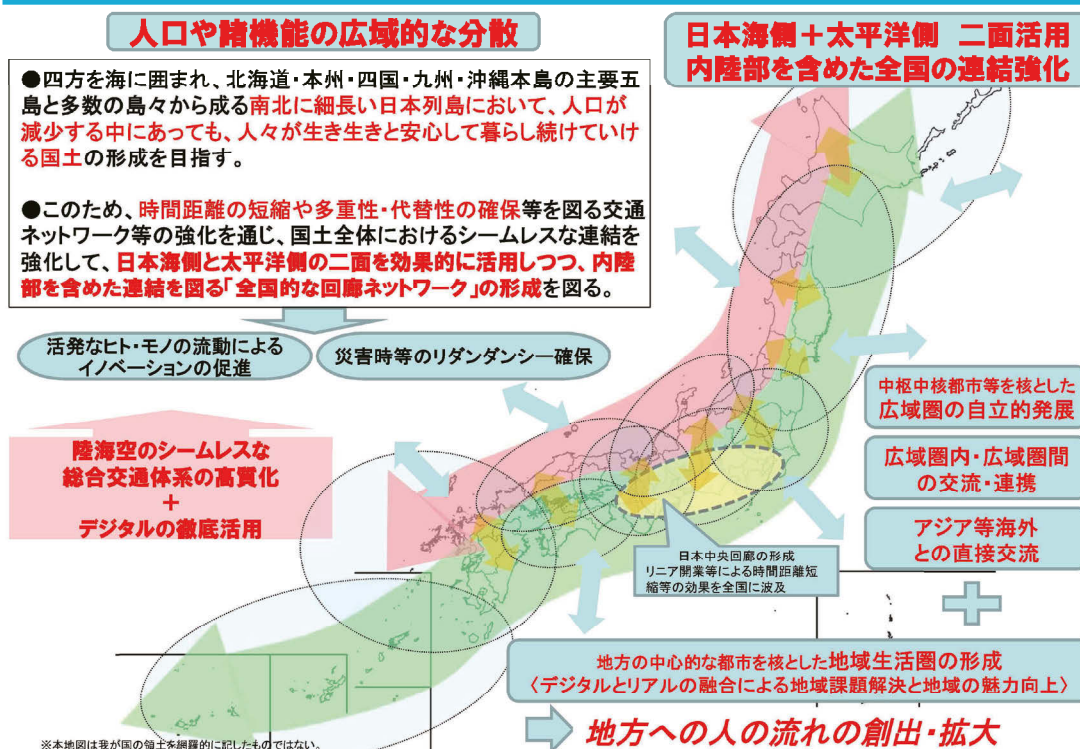


図 4.2.3-1 全国的な回廊ネットワークのイメージ

出典：国土交通省 HP¹⁰⁾

なお、2050年を想定する上では、現在完成もしくは進行中の大規模再開発事業による地下空間（地下街、交通施設、防災施設など）は、継続して使用されるものと想定され、こうした既存および新規インフラが調和的に運用されることが必要であり、こうした視点が将来の国土インフラのあり方を考えるうえで重要になるものと考えられる。

4.2.4 技術革新

2050年の日本社会における未来予測をできるだけ明確に予測し、その社会の実態に即した検討を行うために、社会構造の変化に大きな影響を与える技術革新の動向について、「量子未来社会」での情報インフラの変革、社会全体の「DX化」および本検討の中核テーマである「交通インフラの技術革新」について検討を行った。

(1) 量子未来社会

内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)¹¹⁾によると、Society5.0の実現に向け、量子未来社会ビジョンでは、量子技術を取り巻く環境変化など(量子産業の国際競争の激化、コロナ禍によるDXの急速な進展、カーボンニュートラル社会/SDGsなどへの貢献)を踏まえ、量子技術を社会経済システムに取り込むことで、我が国の産業の成長機会の創出や社会課題の解決などに向け、産学官が一体となって取り組みを推進している。

ここで、次世代の計算機として社会を大きく変えることができる量子コンピュータは、従来型コンピュータの2ビット論理演算処理(0または1)とは異なる動作原理で、量子の重ね合わせ状態によるビットの表現「重ね合わせ」や「量子もつれ(エンタングルメント、量子からみ)」といった量子力学的な振る舞いを使って、複数の計算を同時に行えるシステムである。このコンピュータは従来型コンピュータとは桁違いの計算能力の高さを有しており、新薬の開発や金融市場の予測など、さまざまな課題を解決する計算サービスの実現が期待されている。

量子技術は、従来型技術と比較して、より高速で複雑な問題を解決できる可能性があり、量子と従来型(古典)技術のハイブリッド化により、さらに高度な技術を実現することが期待され、産学官が一体となって研究開発が行われている。以下に、未来社会における量子技術によって創出される価値(量子技術活用イメージ)を示す。

量子技術の利活用によって目指すべき究極の未来社会像として、経済・環境・社会が調和する未来社会像が設定されている。具体的には、「経済成長 Innovation」、「人と環境の調和 Sustainability」、「心豊かな暮らし Well-being」を価値観として、経済・環境・社会が調和する未来社会像に向けて、産学官が一体となって取り組むことを目指している。

量子技術は、将来のコンピューティング、センシング、通信性能などの飛躍的な向上を実現し、創薬・医療、材料、金融、エネルギー、生活サービス、工場、物流、交通、安全・安心などの多様な分野で活用して社会経済にとっての価値を創出できるものである。未来社会ビジョン(図4.2.4-1)¹²⁾の実現に向けて、想定される活用事例をこの図中に合わせて示している。なお、これらは現時点での活用事例であり、今後、産官学が手を取り合って量子技術をさらに発展させ、ユースケースの発掘や技術の進展などによって、新たな事例が創出されていくことが期待されている。

(2) 社会のDX化

DXとは、Digital Transformation(デジタルトランスフォーメーション)の略称で、デジタル技術によって、ビジネスや社会、生活の形・スタイルを変える(Transformすること)である。経済産業省が発表した『デジタルガバナンス・コード2.0(旧DX推



図 4.2.4-1 量子技術活用イメージ

出典：内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局¹²⁾

進ガイドライン)』¹³⁾によると、DXは「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」と定義している。DXが及ぼす社会的影響はIT業界だけでなく、複雑で激しく変化する人間社会に広く深くあらゆる分野に影響を与え、現在では人々のニーズに対応するためにもデータを活用したサービスや商品設計が求められる状況に変化しつつある。表 4.2.4-1 に各分野におけるDX導入効果について示す。

(3) 交通インフラ

国土交通省は、安全な自動運転技術が実用化され、交通事故の発生がほとんどなくなった2050年頃の将来像について次のように予想している¹⁴⁾。

- ① 少子高齢化に伴って、公共交通の衰退が危ぶまれていた地域においては、高齢者などの移動手段が確保される。
- ② 基幹交通インフラの結節点や地方都市においては、必要に応じて自動運転も活用した公共交通網が整備され、自動車を自由に運転できない人でも、必要な生活サービスを享受できる環境が実現していることが期待される。
- ③ 自動運転技術によるトラック隊列走行が実現することで、トラックドライバー1人当たりの輸送量が向上し、ドライバー不足解消に貢献する。

表 4.2.4-1 各分野における DX 化の効果

分野	期待される効果
医療	医療における様々な段階で健康診断、カルテ、診療報酬などから多くのデータを得ることが可能であり、効率的に医療や介護の資源を活用できるようになる。
建設	計画から維持管理の各工程の情報の共有や重機操作の自動化など重機の遠隔操作が可能となり、人材不足を解消できる。 各種 ICT 技術により、現場での作業を遠隔・自動化し、AI を活用して熟練技能を確実に継承するなど、全体的な工数削減や品質向上、重大事故のリスク軽減が見込める。
金融	初期費用やランニングコスト削減、人件費削減などのコスト削減や、AI 活用による定型業務の効率化、生体認証の活用によるセキュリティ向上などを含め、顧客サービスの向上を図ることができる。
農業	生産現場の DX により、効率的かつ安定的な生産性の向上が期待される。 農村地域の DX により、都市と地方の住民の人材交流や複数の集落が連携した農業基盤整備、自然災害対策などへの展開を図ることができる。 流通・消費の DX では、農産物の安全性や品質の向上、需要予測やマーケティングにも効果が期待される。
製造	生産プロセスの見える化・数値化による製造工程全体での効率化と、サプライチェーンにおけるデータ連携で、製造工程の全体の最適化が図れる。 顧客が製品を使用する際のデータ収集・分析結果により、自社製品の改善や新商品の開発への反映やサービスの充実を実現できる。

このように、我が国では、自動化や効率的な輸送技術の開発と交通弱者に対する適切な移動手段の提供が進められるものと考えられる。

こうした中で、特に世界的な環境意識の高まりや、高齢者の移動手段の問題、都心部の人口増加や渋滞などの問題を背景に、エコでコンパクトな超小型モビリティの普及が期待されている。また、道路交通センサによると、自動車を利用する多くの人は近距離での移動をメインとしており、1人で移動することが多い。こうした利用のあり方を背景に、小型モビリティを、「日常の交通手段」、「都心部における小口配送などの商業目的の交通手段」、「観光時の移動手段」として利用するとしている。こうしたことから、2050年に向けて、交通インフラは都市間をつなぐ高速・大量移動と生活圏内をきめ細やかに移動することが可能な小型・簡易なモビリティとの共存する方向に向かうものと考えられる。図 4.2.4-2 にこうした小型モビリティの事例¹⁵⁾を示した。



図 4.2.4-2 自動運転小型電動カート 出典：(国研)産業技術総合研究所¹⁵⁾

4.2.5 人流の変化

我が国の交通を巡る状況は、都市部と地方部では現状と課題が大きく異なっている。都市部では、公共交通サービスは世界トップレベルの水準で提供されている一方、黒字バス路線でも運転者不足が原因で、運行本数を削減せざるを得ない状況が生じ始めている。道路交通においては、混雑による経済的損失や環境問題が発生し、駐車場確保の問題や自転車走行空間のさらなる確保などが課題となっている。

一方、地方部では、自動車による移動が多いことと少子・高齢化の進展によって公共交通サービスの需要が低下しており、運転者不足とあいまってバスやタクシーのサービスの縮小や撤退が顕在化している。このような状況の中で、外出率にも低下が見られるなど、移動そのものの減少も生じつつある¹⁶⁾。以下、都市部と都市近郊および人口減少地域における人流の変化について検討結果を整理する。

(1) 都市部における人流の変化

都市において人々は日々、通勤、通学、買い物、余暇活動のため移動をしていて、これらが人流を生み出している。図 4.2.5-1 は、首都圏における通勤トリップのポテンシャルの経年変化を示しているが、この事例によると、1988年から30年の間、ポテンシャルが最も高いのは千代田区で変わらず、東京周辺が企業の本社機能とそれをサポートする対事業所サービスを担う場所として機能してきたことを反映している。一方で、1988年の時点で横浜、川崎、厚木、千葉などでポテンシャルの局所的なピークが見られ、1998年には立川、2008年には大宮で新たに局所的なピークが出現している。これらは旧国土庁が策定した第四次首都圏基本計画において「業務核都市」として位置付けられた都市であるが、バブル崩壊以降は子育てと仕事を両立させる必要のある共働き世帯の増加などによって職住近接が進み、1995年以降、東京圏において1時間以上の通勤を行う人の割合は減少している¹⁷⁾。

このように、都市部においては今後も都心部へ向かう人流は大きいものの、コロナ禍によるリモートワークなどの働き方の変化もあって、むしろ遠距離通勤は減少し、都市近郊の業務中核都市への人流の増加などの動きが加速するものと考えられる。

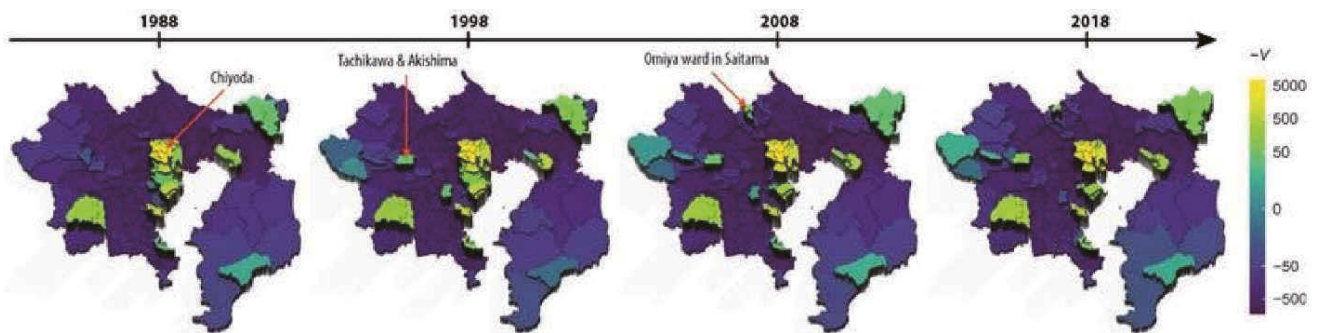


図 4.2.5-1 首都圏における通勤ポテンシャルの地理的分布の経年変化

出典：藤嶋 翔太¹⁷⁾

(2) 都市周辺部・人口減少地域の人流変化

人口減少と少子高齢化などにより、人口減少地域においては、採算悪化によるバス、鉄道便の減便、廃止が全国的に実施され、日常生活における移動を自家用自動車に頼らざるを得ないことが地域交通の大きな課題となっている。

こうした課題を検討する上では、「あらゆる人々が移動ニーズに対応した移動サービスを享受できる社会」を目標に、持続可能で地域最適な利便性の高い交通ネットワークの維持・確保を可能とする交通政策について、民間事業者、地方自治体などからのヒアリングを行い、今後のイノベーションに向けて必要となる見直しや新たな対応を模索する必要がある。より具体的には、交通サービスの利便性向上・再生・維持・確保、地域の鉄道、バス、タクシー、旅客船などの新型輸送サービス、「地域公共交通の活性化及び再生に関する法律」に基づく地域公共交通網形成計画の策定や見直しなど、地方自治体を中心として持続可能な地域交通のあり方を検討することが望まれる。

上記のような地方における様々な課題解決に対しては、近年のIoT化などの急速な進展や交通分野での自動運転技術、MaaS、ライドシェアといった新たな技術・サービスの展開など、交通分野のイノベーションによる人流を確保することが期待されている。以下に人流の未来を実現する上で期待されている技術について概要を示す。

(3) 人流を維持する技術革新

1) 陸上モビリティ

当協会の既往報告¹⁷⁾では、交通インフラとしての駅や地下街利用時の混雑解消や災害時の避難誘導が課題として指摘され、新たな交通決済手段、災害時アナウンスドローン、ライドシェア、空飛ぶ車、接続バス、既存ネットワーク強化、自動運転、MaaS・CASE・地域活性化などが対策技術として挙げられている。

たとえば、MaaSの市場規模は今後急速に拡大していくと考えられ、図4.2.5-2に示すように2030年には国内市場が約6兆円、2050年までには世界市場が約900兆円にまで拡大するとの予測もある¹⁸⁾。

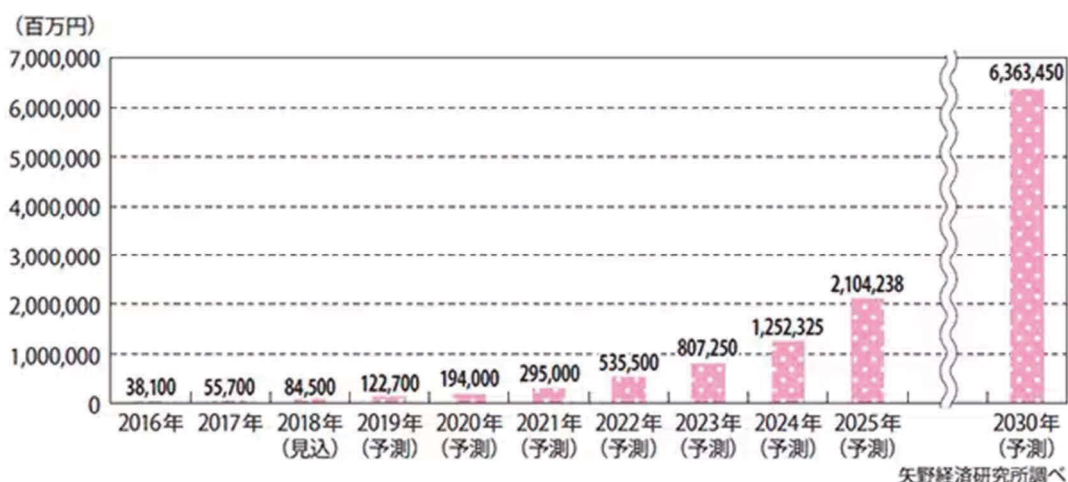


図 4.2.5-2 国内における MaaS の市場予測

出典：国土交通省¹⁸⁾

MaaS にかかわる人流維持のための陸上モビリティの革新技术としては、先に挙げた新たな交通決済手段、空飛ぶ車、接続バス、既存ネットワーク強化、CASE、地域活性化などがある。これらにより、高齢者の移動・買い物手段の確保や運転事故の減少につながるとともに、人の移動が活発化し、都市・地域の活性化や、運転免許証返納後の高齢者を含む誰もが乗客として移動しやすい環境が構築される¹⁷⁾。

2) 水上モビリティ

2019年に発行された「次世代モビリティガイドブック（環境省・経済産業省・国土交通省）」を見ると、自動車を中心とする陸上モビリティについてのみ記載されており、水上モビリティについては言及されていない¹⁹⁾。しかし、水運については、古くから物流手段として発達した一方で、人を運ぶ手段としては川渡しや朝鮮半島への出兵、海外渡航、観光地の湖など限られた用途でのみ利用されていた。最近になって、MaaSの多手段化に伴い、近距離や陸上と一体化させた形で水上の舟運、モビリティが始まっている。

都市部の事例としては、毎週火曜日・水曜日・木曜日（祝日を除く）に豊洲～日本橋の「舟旅通勤」と称して都市型クルーザーによる舟運が開始された（図 4.2.5-3）。また、観光における事例として、西日本旅客鉄道（JR 西日本）が瀬戸内エリアで展開する観光型 MaaS「setowa」は、実証実験を終えて 2020 年 10 月に本格稼働を開始し、観光型 MaaS の先行事例の 1 つとなっている²⁰⁾。

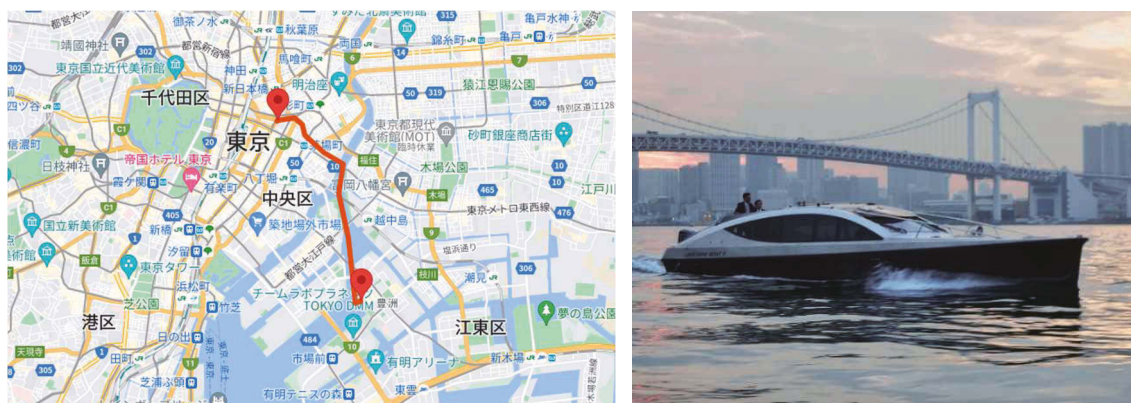


図 4.2.5-3 舟旅通勤のルートおよびクルーズ船

出典：東京舟旅¹⁹⁾

4.2.6 物流の変化

(1) 物流を維持する技術革新

物流に活用可能な技術の開発や新たな技術の物流分野への活用・応用は、労働力不足対策をはじめ物流分野が抱える様々な課題の解決に繋がるものであり、物流の生産性向上に大きく貢献することが期待される。

また、2013年に開催された国連気候変動枠組条約第19回締約国会議（COP19）決定により、2015年7月に国連事務局へ提出された「日本の約束草案」においては、2030年度における温室効果ガス削減目標が設定されたところであり、環境負荷低減の対応も求められている²¹⁾。

以上のような背景において進められている物流に関する技術革新を以下に整理する。

1) 物流デジタル化

労働人口減少に伴い、トラックドライバーをはじめとする労働力不足が深刻化しており、省力化・効率化を進めて生産性を上げる必要に迫られており、ICTやAIの活用を進めていく必要がある。

2) 自動化・機械化

幹線物流においては、トラックドライバーの不足や高齢化を踏まえ、省力化を進めていく観点から自動隊列走行の開発が進められている。同時に、鉄道や船舶の利用も期待されており、合わせて、産業競争力の向上・生産性の向上などの観点から、船舶の自動運航技術の実用化への期待が高まっており、自動運行船の実用化に期待が高まっている。

EC市場の拡大などにより宅配需要が急増する中、物流分野における人手不足や買い物弱者対策などの課題解決のため、自動配送ロボットの社会実装が期待されている。無人航空機については、離島や過疎地での貨物輸送への活用が期待されている。

3) 就業環境の改善

国民生活や企業活動に不可欠な物流の担い手であるトラック運転者の不足は極めて深刻で、トラック運転者がいないために物が運べないこともしばしば生じている。その背景には、出荷元・納品先での待ち時間が長いことによる長時間労働や、積込・積降しなど荷役作業の肉体的負担などがある²²⁾。

これら荷待ち時間や荷役作業時間の長さおよび荷役作業の負担を改善し、トラック輸送の生産性の向上・物流の効率化を図るとともに、女性や60歳代の運転者なども働きやすい労働環境の実現が求められている。

4) 環境負荷低減

2015年、COP21において、2020年度以降の温室効果ガス削減のための新たな国際的な枠組として「パリ協定」が採択された。本協定を踏まえ、我が国は「地球温暖化対策計画」を2016年5月に閣議決定し、中期目標として2030年度までに温室効果ガスを26%減(2013年度比)(運輸部門は27%減)、長期目標として2050年までに同80%減を目指す目標を定めた。このため、運輸部門のCO₂排出量の1/3以上を占める物流分野におけるCO₂削減は極めて重要である²³⁾。

(2) 今後見込まれる物流の変化

現在の物流政策の動向と国土交通省が掲げる2040～2050年頃の社会像から見てくる物流の2050年頃の将来像としては、①商慣行の見直し、②物流の効率化(図4.2.6-1)、③荷主・消費者の行動様式が大きく変化している姿が予想されている。加えて、④自動化(DX,GX,AI)、⑤脱炭素に代表される環境負荷低減、⑥スーパーメガリージョン(対流促進型国土)という社会的・技術的な要請から求められて変化した姿も見えてくる。

特に、海外や遠隔地との大量輸送物流を捉えた時には、輸送施設・機器の自動化・大型化、輸送荷姿などの標準化(図4.2.6-2)、再生可能エネルギー由来の輸送機器(自動車、鉄道、船舶、航空機など)への転換、共同輸配など機器の有効利用を踏まえたモーダルシフトや多様な交通モード(自動車、鉄道、船舶、航空機など)間の接続(モ

一ダルクネクト)の強化(図4.2.6-3)、3次元にまで拡張した既存・新設空間の有効利用に基づく人・物の物理的分離、さらにはMaaSを活用した荷主も取り込んだデータのサイバー空間上での相互連携など(図4.2.6-4)が重要な要素として取り込まれてくると考えられる

なお、社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会第23回物流小委員会では、新技術を活用した物流について²⁶⁾、国内での検討事例(図4.2.6-5)に加えて、スイス(図4.2.6-6)、イギリスにおける検討・計画事例を挙げている。その中で特に道路空間での活用(図4.2.6-7)に当たって、その可能性の整理と共に(表4.2.6-1)、一般乗用車両との走行空間の棲み分け、物流需要に応じた他の交通モードとの役割分担、積み替えなどにかかわる輸送モード間での接続方法、事業スキーム上の建設も含めた費用負担などの課題を挙げている。

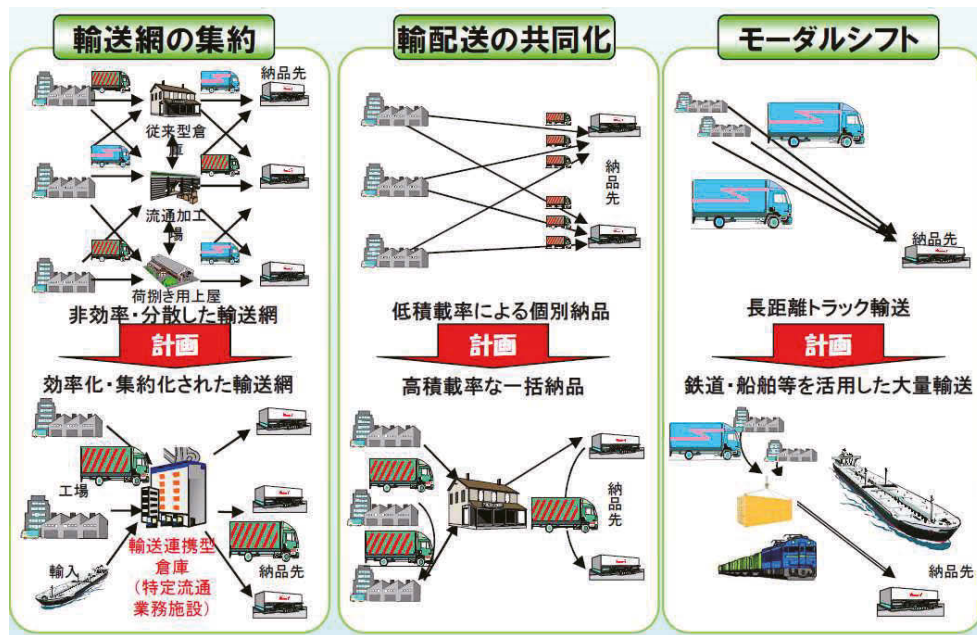


図4.2.6-1 物流業務総合効率化の例 出典：鉄道利用運送推進全国大会²⁴⁾

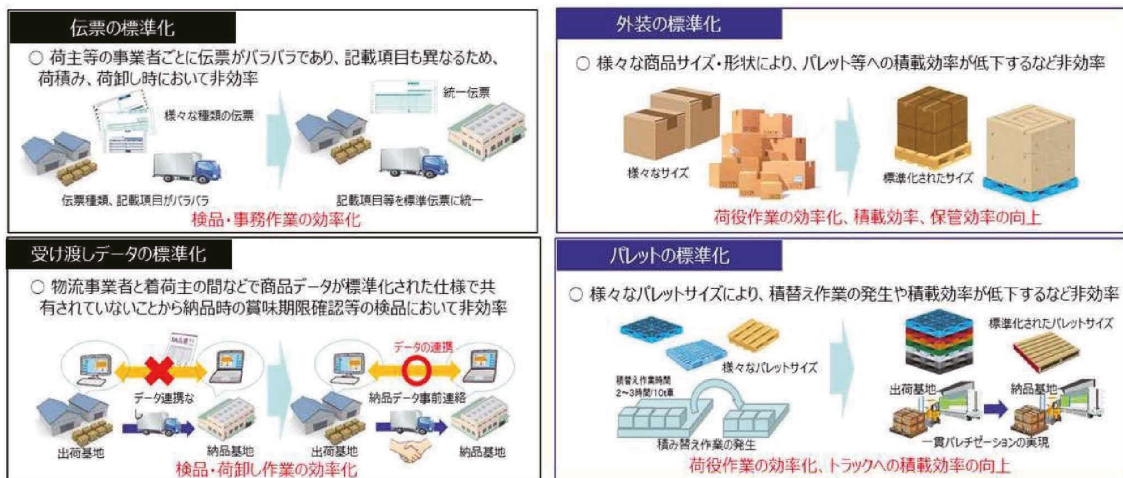
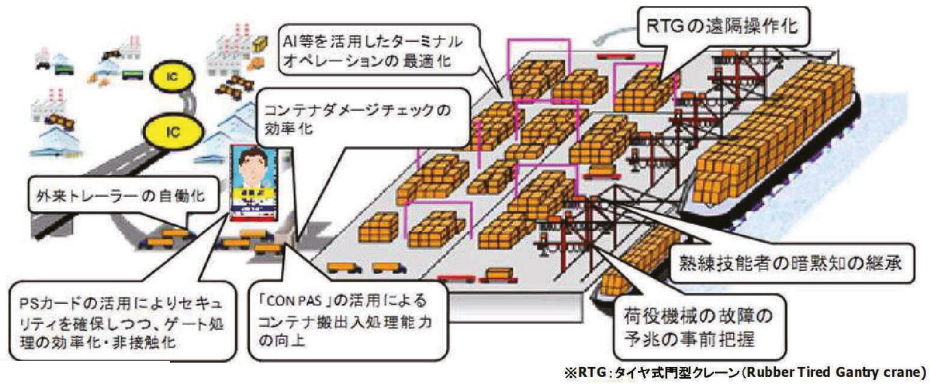
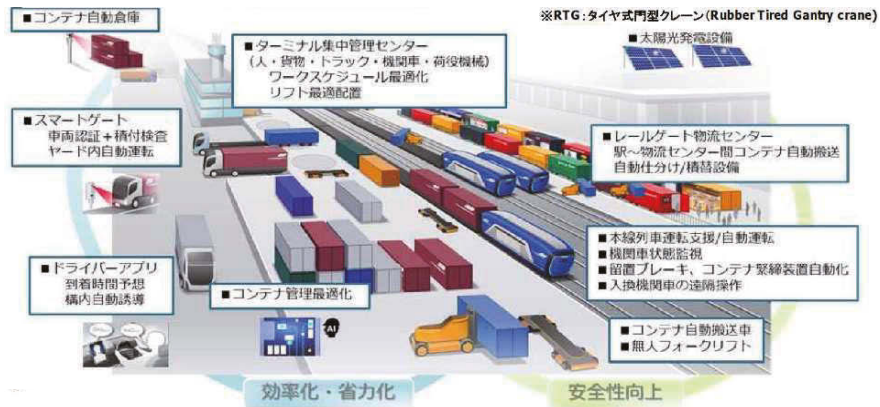


図4.2.6-2 モノ・データ・業務プロセスなどの標準化のイメージ例 出典：鉄道利用運送推進全国大会²⁴⁾



(a) ヒトを支援する AI ターミナル



(b) スマート貨物ターミナル

図 4.2.6-3 物流モダルコネクットのイメージ例

出典：(公社)日本通運連盟 HP²⁴⁾

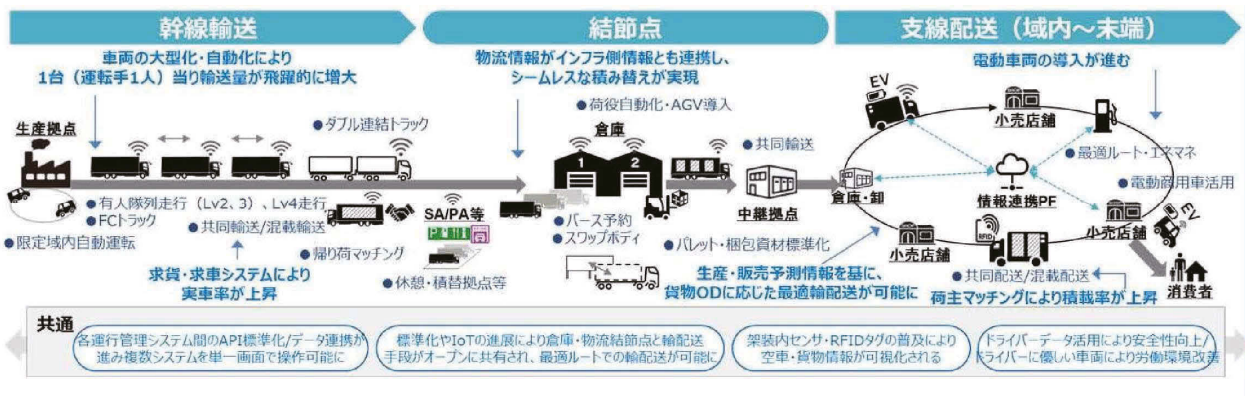


図 4.2.6-4 物流 MaaS のイメージ

出典：(公社)日本通運連盟 HP²⁴⁾



図 4.2.6-5 都市間物流イメージ

出典：道路広報センター²⁵⁾、建設省²⁶⁾

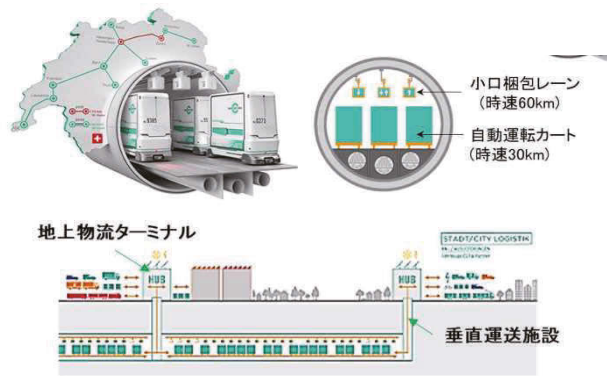


図 4.2.6-6 スイス地下物流システム

出典：国土交通省 HP²⁷⁾
(Cargo Sous Terrain 社 HP²⁸⁾に追補)

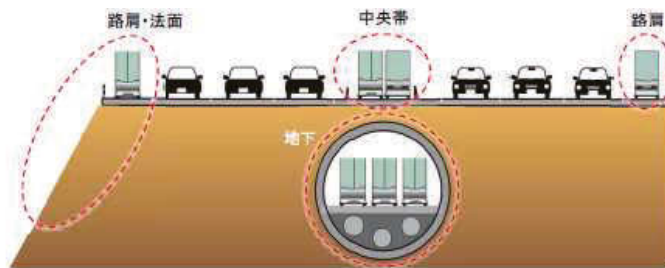


図 4.2.6-7 道路空間の利活用イメージ

出典：国土交通省 HP²⁷⁾

表 4.2.6-1 新技術を活用した新たな物流形態の事例にみる論点と課題等

出典：国土交通省 HP²⁷⁾

論点	形態等	課題等
活用空間	地上の既存道路空間の活用 (中央帯・路肩等) ↔ 地下に新たな空間を整備	・非常駐車帯等、安全機能の確保 ・トンネル・橋梁等との干渉 ・コスト ・IC等との接続方法
地域・区間	都市間長距離幹線 ↔ 物流拠点間 ↔ 都市内	・物流需要や他モードとの役割分担
輸送モード	トラック ↔ パレット ↔ 専用コンテナ	・積み替え・既存交通との接続方法
事業スキーム	民間 ↔ 公共	・費用負担

4.3 今後の課題

本検討では、人流、物流の特性を踏まえた地下インフラ構築を検討するために、2050年を想定した近未来における我が国の姿について、気候変動、人口動態の変化をベースに検討した。特に、こうした近未来の国土インフラを支える技術革新の動向から、特に人流と物流の姿を想定した。

前提条件となる自然環境や人口動態に関しては、全地球的な温暖化が進む中で、我が国の人口は減少傾向が継続し、同時に高齢化が加速するものと想定されている。こうした状況において国力を維持・向上させるためには、大規模かつ革新的な技術による強靱な国土インフラの整備と生産性の向上が不可欠であり、そのために量子コンピュータによる情報処理技術の革新的な向上、各方面におけるDX化による生産性の向上と様々な分野における生活や仕事の進め方の大きな変革が進められている。こうした流れを受けて、人流、物流ともこれまでの延長線上にはない、大きな変革が求められている。

次年度の研究においては、大きく変化する人流や物流を成立させるための変革の方向性について検討するものとするが、その中では以下のような課題があると考えている。

- ① 2050年における人流・物流のあるべき姿を具体的なイメージとして描く必要がある。
- ② 上記の姿を実現させるうえで、現在のインフラの更新・改良の方向性を明確にする必要がある。
- ③ 上記の検討においては、現在の地下インフラの利用を継続しながら、効率的に新たな更新を推進する必要がある。

こうした課題についての調査検討を行うことで、将来の人流および物流の変化に対応した地下インフラの在り方を示していきたい。

【参考文献】

- 1) (一財)エンジニアリング協会地下開発利用研究センター：2022年度(2022M-094)ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究報告書，2023年3月
- 2) 勿来 IGCC パワー合同会社 HP(参照 2024.01) <http://www.nakoso-igcc.co.jp/>
- 3) 浪江町産業振興課：浪江町における水素利活用の取組み，2023年(令和5年)12月
- 4) 国土交通省：国土交通白書 2022 (参照 2023.12)
<https://www.mlit.go.jp/statistics/hakusyo.mlit.r4.html>
- 5) 気象庁 HP：IPCC AR6 WG1 報告書 政策決定者向け要約(SPM) 暫定訳(2022年12月22日) (参照 2023.12) <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/index.html>
- 6) 国土交通省：国土交通白書 2022 (参照 2023.12)
<https://www.mlit.go.jp/statistics/hakusyo.mlit.r4.html>
- 7) 経済産業省：2050年までの経済社会の構造変化と政策課題について,平成30年9月 (参照 2023.12)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/2050_keizai/pdf/001_04_00.pdf
- 8) 厚生労働省：我が国の人口について (参照 2023.12)
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_21481.html
- 9) 国土交通省：我が国経済とこれを取り巻く環境 (参照 2023.12)
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/hakusho/h28/html/n1111000.html>

- 10)国土交通省：第三次国土形成計画(全国計画)(参照 2023.11)
https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudokeikaku_fr3_000003.html
- 11)内閣府統合イノベーション戦略推進会議：量子未来社会ビジョン,令和 4 年 4 月 22 日
(参照 2023.12)
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshimirai_220422.pdf
- 12)内閣府科学技術・イノベーション推進事務局：量子未来社会ビジョン概要,令和 4 年 4 月 22 日(参照 2023.12)
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshi_gaiyo_print.pdf
- 13)経済産業省：デジタルガバナンス・コード 2.0(参照 2023.12)
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/investment/dgc/dgc.html
- 14)国土交通省：国土交通白書「予想される未来の社会環境」「イノベーションが描く 2050 年の我が国」「2050 年における国土交通分野の未来予想図」(参照 2024.1)
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h28/hakusho/h29/html/n1310000.html>
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h28/hakusho/h29/html/n1321000.html>
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h28/hakusho/h29/html/n1322000.html>
- 15)(国研)産業技術総合研究所：ラストマイル自動走行の実証評価(永平寺町)に係わる新たな実証を開始(参照 2023.12) https://www.aist.go.jp/aist_j/news/au20181114.html
- 16)国土交通省都市局：健康・医療・福祉のまちづくりの推進ガイドライン, 2014.8
- 17)藤嶋 翔太：人の流れから都市の姿を描く, 一橋大学ウェブマガジン, 2023.7.3(参照 2023.12) https://www.hit-u.ac.jp/hq-mag/research_issues/521_20230703/
- 18)国土交通省：国土交通白書 2020(参照 2024.2)
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/html/n1213000.html>
- 19)東京舟旅：TRY!舟旅通勤(参照 2023.11) <https://www.suitown.jp/cruise/234/>
- 20)トラベルボイス HP：JR 西日本が本格稼働した観光型 MaaS「setowa」, その取り組みと今後の展望とは?(参照 2021.3) <https://www.travelvoice.jp/20210324-148371>
- 21)国土交通省社会資本整備審議会交通政策審議会：今後の物流政策の基本的な方向性等について(答申), 平成 27 年 12 月 25 日
- 22)内閣官房 HP：物流革新緊急パッケージ,令和 5 年 10 月 2 日(参照 2024.2)
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/buturyu_kakushin/pdf/kinkyu_package_1006.pdf
- 23)国土交通省：大型車の地球温暖化対策に関する現状について(国内の現状)(参照 2023.12) <https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001324748.pdf>
- 24)(公社)日本通運連盟 HP：最近の物流政策の動向について, 鉄道利用運送推進全国大会, 令和 5 年 2 月 9 日(参照 2024.2)
https://www.t-renmei.or.jp/info/pdf/zenkokutaikai_16th_01_1.pdf
- 25)道路広報センター：NEXT WAY, 平成 4 年
- 26)建設省：新物流システム資料, 平成 7 年.
- 27)国土交通省:社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会第 23 回物流小委員会,新技術を活用した物流について, 令和 5 年 7 月 20 日(参照 2023.12)
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001620632.pdf>
- 28)Cargo Sous Terrain 社 HP(参照 2023.12)例えば, <https://www.cst.ch/>

5. 地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究

5.1 調査経緯・調査方法

5.1.1 調査方針・概要

第4部会では「地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究」というテーマに対し、近年多くなってきている多目的型地下インフラモジュールを対象に、2023、2024年度の2か年で調査・研究を実施するものである。2023年度は「地下空間を経済的、効率的に利用するために多目的に人流、物流、備蓄、避難などに対応できる（大深度）地下インフラを構想する」ところまでを想定した。

テーマの「地下インフラモジュール」における機能・用途は重要な要素であり、本調査では地下インフラモジュールが多目的であることを意識した。「多目的型地下インフラモジュール」とは、「複数の用途を有する多機能な地下施設を含む不特定多数が利用する社会基盤施設」と定義した。これは一般的な多目的の概念をさらに細分化し、機能面を取り扱うことにより、調査範囲が広がることを期待したものである。

調査においては、まず地下空間利用の歴史、将来の利用計画、関連法規、要求性能や各種課題を整理し、国内外の供用事例を調べることにした。次にこれらの施設の構造的分類を行うことにより、それぞれの特徴を把握することとした。そのための設計手法を調査する中で、地下インフラ施設の課題が浮き彫りになり、問題提起を行うとともに、さらに構築・再構築の方法・事例の調査を行うことにした。

机上調査に加えて、ヒアリング・現地調査を行うことにより、調査の深度化をねらった。ヒアリング・現地調査の対象となる施設・事業は「5.1.2 関連施設への現地調査・ヒアリング調査」に示す5か所とした。

5.1.2 関連施設への現地調査・ヒアリング調査

(1) 大谷石採掘場跡地

1) 調査概要

栃木県宇都宮市大谷地区一帯は古くから大谷石が採掘されてきた。地下部分の採掘によって大空洞が形成され、現在ではほとんどが水没して放置されている状態であり、管理されていない範囲が多い。この空洞部分で落盤が生じ、それに伴う大規模な陥没も発生している。

今回の調査では採掘に関係のある大谷資料館、大谷地下資源研究所展示室（川崎地質(株)）、大谷石採取場跡地観測所（(公財)大谷地域整備公社）の3か所を訪問し、陥没の対策状況や地下利用状況の現地調査・ヒアリング調査を行った。

2) 調査実施状況

日時： 2023年8月4日（金）13:30～17:00

場所： 大谷資料館

大谷地下資源研究所展示室（川崎地質(株)）

大谷石採取場跡地観測所（(公財)大谷地域整備公社）

出席者： 第4部会 栗山部会長、福田委員
第4部会以外 地下利用推進部会関係者

(2) 首都圏外郭放水路

1) 調査概要

埼玉県の中川・綾瀬川の流域は、利根川や江戸川、荒川といった大きな川に囲まれている。この地域は土地が低く水がたまりやすいお皿のような地形となっているため、これまで何度も洪水被害を受けてきた。洪水対策として建設された首都圏外郭放水路は世界最大級の地下放水路であり、周辺河川が洪水となった時、洪水の一部をゆとりのある江戸川へと流す機能を有する。2002年に部分通水開始、2006年に全区間供用が開始され、年平均7回の稼働実績があり、2019年10月までの周辺地域の被害軽減効果は1,484億円とされている。

今回の調査では、一般にも募られて定期的に行われている見学会に応募し参加すると共に、見学会後には国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所首都圏外郭放水路管理支所長の宮寄氏へのヒアリングを行った。事業計画、建設時の経緯から現在の運用・管理状況に至るまで広く有意義な情報が得られた。現在は洪水対策としての用途以外にテレビや映画の撮影、プロモーションビデオの撮影に利用されている。また見学者からはシェルターやコンサート会場などに利用できないかといった意見が挙がっているとのことである。

2) 調査実施状況

日時： 2023年11月13日（月）15:00～17:30
場所： 首都圏外郭放水路 龍Q館（庄和排水機場）、調圧水槽、第1立坑
出席者： 国土交通省 関東地方整備局 江戸川河川事務所
首都圏外郭放水路管理支所 宮寄支所長
第4部会 栗山部会長、本多副部会長、岩崎委員、田中(義)委員、
浜田委員、福田委員
事務局 塩崎副所長、武井主幹

(3) 神戸市三宮周辺の地下施設

1) 調査概要

神戸市三宮周辺の地下には、「さんちか（正式名称：三宮地下街）」という愛称の地下街があり、さんプラザ、センタープラザなどの地下には、多くの飲食店が入居し、これらは地下道で繋がっている。また、地下鉄三宮駅を含む7つの駅舎、三宮中央通り駐車場、三宮バスターミナル、神戸阪急（阪急百貨店）などと地下道で繋がっており、大規模な地下インフラネットワークが形成されている。

神戸市では、2017年12月に閣議決定された「国民の保護に関する基本指針」に基づいて、堅牢な建築物や地下施設を緊急一時避難施設として指定している。

今回、神戸市三宮周辺の地下施設を対象として現地調査を実施するとともに、神戸

市建設局の方々に三宮中央通連絡地下通路（サンポチカ）を案内いただきながら、緊急一時避難施設にかかる事項に注目してヒアリングを行った。

国民保護法施行に伴い、施設構造の補強を行っておらず、Jアラート発出から周囲の安全が確保されるまでの数時間の避難場所という位置付けでの運用がなされている。また都心エリアに位置しており、「にぎわい」「いこい」の拠点創出のために通路壁をキャンパスに見立てた「アーティスト」の部屋としての利用がされており、使用頻度の向上が検討されている。

2) 調査実施状況

日 時： 2023年11月28日（火）13:30～15:30

場 所： 三宮中央通連絡地下通路（サンポチカ）

出席者： 神戸市建設局 道路計画課 神吉職員、道路管理課 川南係長
第4部会 栗山部会長、本多副部会長、田中(義)委員、浜田委員、
村下委員、福田委員、田中(宏)委員
事務局 武井主幹

(4) 寝屋川北部地下河川

1) 調査概要

大阪府寝屋川流域では総合治水対策の一環として、寝屋川北部地下河川（都市計画河川寝屋川北部地下放水路 全長約14.3km）が計画されている。松生立坑（門真市）～鶴見立坑（守口市）～讃良立坑（寝屋川市）の9.7km区間は令和2年度末に完成し、貯留施設として暫定供用されている。大川（都島区）～鶴見立坑の4.6km区間は、従前の計画では都市計画道路北野今市線・都島茨田線の道路整備にあわせ、その地下に整備することとしていたが、地下河川を整備できるまでには至っていない。このような状況を踏まえ、大阪府では寝屋川北部地下河川の早期完成を目指すため、当該区間で「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法（大深度地下使用法）」に基づき、大深度地下の使用認可を取得し、事業を進めている。

今回、施工中の城北立坑と供用中の西郷通調節池を訪問し、寝屋川北部地下河川の現地調査およびヒアリング調査を行った。

城北立坑は沈設深さ102.2m（外径34.8m、壁厚3.4m）のオープンケーソン工法による立坑築造工事が行われており、完成後はシールドマシン発進基地となり、鶴見調節池と都島調節池を掘進する予定である。自動化オープンケーソン工法の施工状況を視察し、施工管理方法のヒアリングを行った。

西郷通調節池は、平成26年度に供用を開始した貯留容量40,000m³の流域調節池である。洪水時に公共下水道から取水し、水位が下がってから、西三荘水路に放流している。平成23年8月の豪雨では308,000m³を貯留し、治水施設の効果により被害が大きく軽減された。調節池施設内を視察し、運用方法や維持管理に関するヒアリングを行った。

2) 調査実施状況

日 時： 2023年11月29日（水）9:30～12:00

場 所： ①寝屋川北部地下河川 城北立坑インフォメーションセンター
②西郷通調節池

出席者： 大阪府寝屋川水系改修工営所 安岡グループ長、山本主任専門員、
濱本主任専門員

戸田・ハンシン・大容特定建設工事共同企業体 中島所長

第4部会 栗山部会長、本多副部会長、田中(義)委員、村下委員、
福田委員、田中(宏)委員

事務局 武井主幹

(5) 阪神高速淀川左岸線（2期）工事

1) 調査概要

淀川左岸線（2期）は、阪神高速道路3号神戸線（海老江JCT）から国道423号新御堂筋（(仮称)豊崎IC）を結ぶ延長4.3kmの地域高規格道路である。淀川左岸線（2期）の整備により、大阪都心北部地域での交通混雑の緩和と市街地環境の改善を図ることが可能となる。2006年（平成18年）度からは大阪市と阪神高速道路(株)との合併施行方式により事業を実施している。

今回、鴻池・あおみ・久本特定建設工事共同企業体工事事務所を訪問し、「淀川左岸線（2期）トンネル整備工事-1」の現場調査およびヒアリング調査を行った。本工事では各種地盤改良による準備工事の後、開削工法による道路構造物の構築が進んでいた。堤防の一部となる完成に至るまでに、2025年開催予定の大阪万博のアクセスルートとして暫定供用も検討されているとのことであった。

2) 調査実施状況

日 時： 2023年11月29日（水）14:00～16:00

場 所： 鴻池・あおみ・久本特定建設工事共同企業体事務所

出席者： 鴻池・あおみ・久本特定建設工事共同企業体 吉田係員

第4部会 栗山部会長、田中(義)委員、村下委員、福田委員、
田中(宏)委員

事務局 武井主幹

5.2 地下インフラモジュールについて考える

5.2.1 地下インフラモジュールとは

本調査では地下インフラモジュールとして、多目的型地下インフラモジュールを取り扱うこととした。

(1) 多目的型地下インフラに求められる機能と種別

多目的型地下インフラに求められる機能を表 5.2.1-1 にまとめる。またこれらの機能を用いている地下施設は表 5.2.1-2 のようなものが存在する。

表 5.2.1-1 多目的型地下インフラに求められる機能

1) 恒温機能	2) 避寒・暑機能	3) 恒湿機能
4) 遮光機能	5) 安置機能	6) 処分機能
7) 貯蔵・貯留機能	8) 地下水賦存機能	9) 防災機能
10) 防衛・防犯機能	11) 交通・運輸機能	12) エネルギー生産・拡散機能

表 5.2.1-2 多目的型地下インフラの種類

a) 住居	b) 墓所	c) 貯蔵庫
d) 栽培庫	e) 上水取水・貯蔵施設	f) 下水敷設
g) 鉄道、駅	h) 自動車道、駐車場	i) 交通結節点
j) 通信施設	k) 電線、変電所、発電施設	l) ガス管、エネルギー貯蔵施設
m) 導・放水路、調整池	n) 避難所、避難路	o) 歩行者通路
p) オフィスビル、商業施設、街区		

これらの施設について、現代の地下空間の機能や地下化可能な施設に関する概念は、基本的に変わっていない。また、1970年の経済協力開発機構（OECD）の提言にも「21世紀の都市は、地上の使用を住宅・公園・広場に限定し、運輸・交通・通信・電力・水道・ガスなどの建設はもとより、駐車場・倉庫、廃棄物・下水の処理施設もすべて地下に收容することを理想とする」と謳われていることを考えると、地下施設は本来、多目的であり得るといえる。

(2) 多目的型地下インフラの分類

多目的型地下インフラを「構造形式」「用途」「目的」の観点で、図 5.2.1-1 のように分類した。例えば、「中之島まちみらいビジョン 2023」¹⁾の事例を取り上げる。大阪市の中之島は、江戸時代以降経済はもちろん、文化や教育でも先進的な取り組みを重ね、「B×a×①・⑥」として大阪の中心として繁栄してきた。

構造形式上の分類	用途上の分類	多目的種別
A. 地下のみで構成される	a. 計画時から単一目的	①人流（人と交通） ②物流（貨物） ③エネルギー備蓄 （発電、備蓄、貯蔵、送配電、熱） ④備蓄 （食料、駐輪場、駐車場） ⑤避難（シェルター） ⑥文化施設・実験施設 ⑦上下水道 ⑧通信 ⑨防災 ⑩貯水 ⑪その他
B. 地上と地下で構成される	b. 計画時から多目的	
	c. 運用中に単一目的から多目的に変更	
	d. 当初目的を終えて新たな利用目的（単一・多目的）	

図 5.2.1-1 多目的型地下インフラの分類

一方で、近年では、なにわ筋線の事業化や未来医療国際拠点の整備決定など、さらなる動きが具体化し、中之島西部を中心に居住人口の増加も進んでいる。また、大阪府全体では、大阪・関西万博の開催をはじめ、国際的な魅力創造に向けた取り組みも進んでいる。そこで、「B×a×①・⑥」に加え、②・⑤・⑧などを重点施策として位置づけ、地上・地下を含めた街インフラとして中之島まちみらいビジョンを推進している。

5.2.2 多目的（用途）の要求性能

多目的型地下インフラの要求性能として、「任意の複数の利用目的（用途）を満足する地下空間の規模・形状、連続性、構築場所、設備の設置、維持管理・更新など」の事項が挙げられる。それぞれについて概説する。

(1) 地下空間の規模・形状

地下空間の規模は、利用目的に応じて適切に設計されなければならない、その形状も機能性や安全性を考慮して適切に決定されなければならない。

地下空間の規模について、例えば地下鉄駅や地下商店街のような交通利用や商業利用のための地下空間では、多くの人々が利用、活動することを考慮して十分に広い空間が必要となる。また地下駐車場や地下貯蔵庫のような利用目的では、車両や物品の収容スペースを確保することが必要である。

地下空間の形状については、地盤の状況や地下水の影響、周辺の建造物との関係などを考慮して適切に設計されなければならない。また、地下鉄トンネルのような長大な地下構造物では地下水の影響を受けにくい形状や地盤の安定性を確保するための適切な支持構造が求められる。

(2) 地下空間の連続性

地下空間の連続性は、複数の利用目的に適応し、それらの目的を統合的にサポートする能力を意味する。地下空間の連続性が確保されることで、異なる用途や機能が調和して共存し、効果的に運用される。

また、地下空間の連続性は地下商店街や地下ショッピングモールなどの商業施設にも適用される。これらの施設では、地下空間が複数の店舗やサービス、歩行者通路などを結びつけ、一体的な空間として機能している。海外の事例では地下の堅牢な岩盤を掘削して築かれた歩行者通路の特徴を活かした独創的な空間が実現されている(図 5.2.2-1)。天井の高い大空間の壁には、凹凸のある岩肌が露出しており、様々な壁画や彫刻で装飾されている。このように連続性が確保されることで、利用者はスムーズに移動し、安心して異なる店舗やサービスを利用することができる。



図 5.2.2-1 ストックホルム地下駅にあるアーティスティックな空間

地下空間の連続性を確保するためには、利用目的や機能を総合的に考慮し、連続性を果たせるための適切なアクセスポイントや結節点を設けることが重要である。また、施設間の連携や利用者の利便性を考慮した設計が不可欠である。これにより、地下空間が複数の利用目的を持ち、連続性を持って機能することが可能となる。

(3) 地下空間の構築場所

地下空間の構築場所は、地域の地質条件、地下水位、地下の他のインフラストラクチャーとの関係、そして地上の土地利用などに影響される。これらの要素は、地下空間の構築場所を選定する際に重要な役割を果たす。

構築場所の選定には、様々な利用目的が考慮される。例えば、都市部では、地下鉄駅や地下ショッピングモール、地下駐車場などが一般的な利用目的として挙げられる。これらの施設は、都市の中心部や交通の要所に位置していることが一般的である。また、災害時の避難所としての利用も考慮される。また、武力攻撃に対する避難所の用途を持たせることが求められる場合、ある程度深度が大きく、かつ安全性やアクセスの容易さが重視される。神戸市では、2023年3月現在地上建物297施設、地下47施設を国民保護に関する緊急一時避難施設に指定しており、民間施設地下駐車場や地下道など、新たに91施設を緊急一時避難施設として指定している²⁾。

一方、構築場所の選定には地域の将来の発展や変化も考慮されるべきである。例えば、都市の拡大や再開発が予測される地域では、将来の需要や利用可能性を考慮する。また地域の環境や景観にも影響を与えるため、これらの要素も考慮する必要がある。

(4) 設備の設置

地下空間を多目的な用途で使用するには、それぞれの目的に応じた設備の設置が必要

である。例えば常時駐車場の場合、照明、通信設備、消火設備などが必要となる。緊急時にその駐車場が避難所とする場合には、電気が消えて非常照明だけになっても避難誘導を補助する設備、海外の避難者にも対応できるような多言語型非常放送設備、他にも十分な換気設備、給水設備、トイレ、非常用電源などの設置が必要となる。

(5) 維持管理・更新

地下空間は長期間供用されるため、施設や設備の維持管理、および更新が不可欠である。つまり時代の変化や技術の進歩に応じて、新しい設備や機能を追加し、地下空間の機能を向上させることが重要である。また設備などの定期点検や保守、更新が必要である。例えば地下駐車場の場合、充電ステーションやセキュリティシステム、商業施設の場合、最新のセキュリティシステムやデジタルサイネージなどの設備を追加することで、利便性を向上させることができる。オフィススペースの場合、最新の通信設備やエネルギー効率の高い照明設備などを導入することで、働く環境を改善することができる。

5.2.3 関連法規

地下インフラに関係する法制度は多種多様であり、事業主体と土地所有者の組み合わせや種類などによって対象の地下インフラには複数の法制度が適用される。地下空間の社会的な属性は、地上部の土地所有形態と深度により異なっており、概念的に区分すると図 5.2.3-1 のように示される^{3),4)}。浅深度において多様な地下インフラが数多く存在し、それらの区分は、複合施設、交通施設、その他の施設などとして整理される。



図 5.2.3-1 地下空間の社会的属性による区分と利用状況

出典：大沢昌玄⁴⁾

地下空間利用に関連する法制度の概要を表 5.2.3-1 に示す。これには事業主体と用地の

所有区分の関係で適用される法制度をまとめている。ここで事業主体は公共事業者（国、地方自治体など）、公益事業者（上下水、電気、ガス、通信、鉄道など）、民間事業者（商業、工業、住宅など）に区分される。また用地の所有は公共用地と民間用地に区分される。

表 5.2.3-1 地下空間利用に関わる法制度のまとめ（事業主体と用地所有）

項目 事業主体	用地の所有区分				備 考
	公共用地		民間用地		
公共事業 ※1	道路法	道路本体 道路付属物 道路接続施設 兼用工作物	道路法	立体道路制度 道路外利便施設	<ul style="list-style-type: none"> 法ごとに対象とする施設が具体的に定められており、施設整備の用地（公共施設を整備するための土地）は、所有権を持つことが原則とされている。 複数の公共施設が合築すること等により、合理的に機能を発揮できると考えられる場合は、兼用工作物としての整備が可能となっている。 都市部等において土地所有に障害がある場合、空間の有効利用が望まれる場合等において、民有地内に区分地上権等を設定し、立体的空間に公共施設整備を行える（立体道路制度等）。 財産権（土地所有権）は憲法で認められた権利の一つであるが、規定された地域の大深度、公益性を有する施設に限り地下空間の使用が認められている。
	河川法	河川本体 河川管理施設 兼用工作物	河川法	河川立体区域制度	
	都市計画法	都市施設 公園施設	都市計画法	立体的都市計画制度	
	都市公園法	占用規定で明示 兼用工作物	都市公園法	立体都市公園制度	
	大深度法	(占用許可不要)	大深度法	空間使用の担保	
公益事業 ※2	道路法	占用規定 義務占用	一般には地権者との協議による用地買収（所有）、区分地上権等により用地を取得するが、その多くは土地収用法の対象事業とされている。	<ul style="list-style-type: none"> 公共用地を公益事業で利用する場合は占用許可のもとに施設整備が行われる。 占用が許可される施設は法ごとに具体的に規定されているが、示されている施設もその公益性が求められている。 道路占用の特例として電気、ガス、通信等の高い公益性を持つ事業は、占用が原則認められている。 	
	河川法	政令による対象 施設提示			
	都市計画法	都市施設の定義 で明示			
	都市公園法	占用規定			
民間事業 ※3	道路法	占用	公共減分 (都市再開発、都市再生) 区画整理事業	<ul style="list-style-type: none"> 通路、連絡路等の公益性の高いものについては占用が認められている。 大規模開発（商業、住宅等）については道路、公園等の公共施設等の整備が求められているとともに容積率の上乗せ等のインセンティブが与えられる。 	
	河川法	占用			

※1 道路および道路付属施設、河川施設、都市施設等

※2 上水、下水、電気、ガス、通信、鉄道等（ただし、鉄道は共同溝法における公益事業から除外されている）

※3 ここでは、都市再開発、都市再生事業等における公益施設についてのみ記述している。

出典：(一財)エンジニアリング協会⁵⁾

ここで、適用される法令などが複雑で様々な制度が関与している地下街に関して、主な法令などを図 5.2.3-2 に示す⁶⁾。適用される主な法令以外では、地下街の立地によって、河川法、都市計画法、都市公園法などが適用されることがある。さらに、地下空間の高度利用の方策として、道路や都市公園などを立体的に利用する諸制度が整備されている³⁾。

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」の目的は、公共の利益となる事業による大深度地下の使用に関し、その要件、手続などについて特別の措置を講ずることにより、当該事業の円滑な遂行と大深度地下の適正かつ合理的な利用を図ることとされている⁷⁾。大深度法において、大深度地下の定義は、以下に示す①または②のうち、いずれか深い方の深さの地下とされている。また、大深度地下であれば、地上の所有権が及ばず公共目的であれば利用することが可能とされている。

[大深度地下の定義]

- ①地下室の建設のための利用が通常行われない深さ（地下 40m 以深）
- ②建築物の基礎の設置のための利用が通常行われない深さ（支持地盤上面から 10m 以深）

これまでの地下インフラに関係する法制度の整理から、多目的型地下インフラにおいては、これら多種多様な法制度が立地条件や利用条件（複数の利用目的）などに応じて個々に適用され、より複雑な関係性の中で構築・再構築や利用が行われると考えられる。

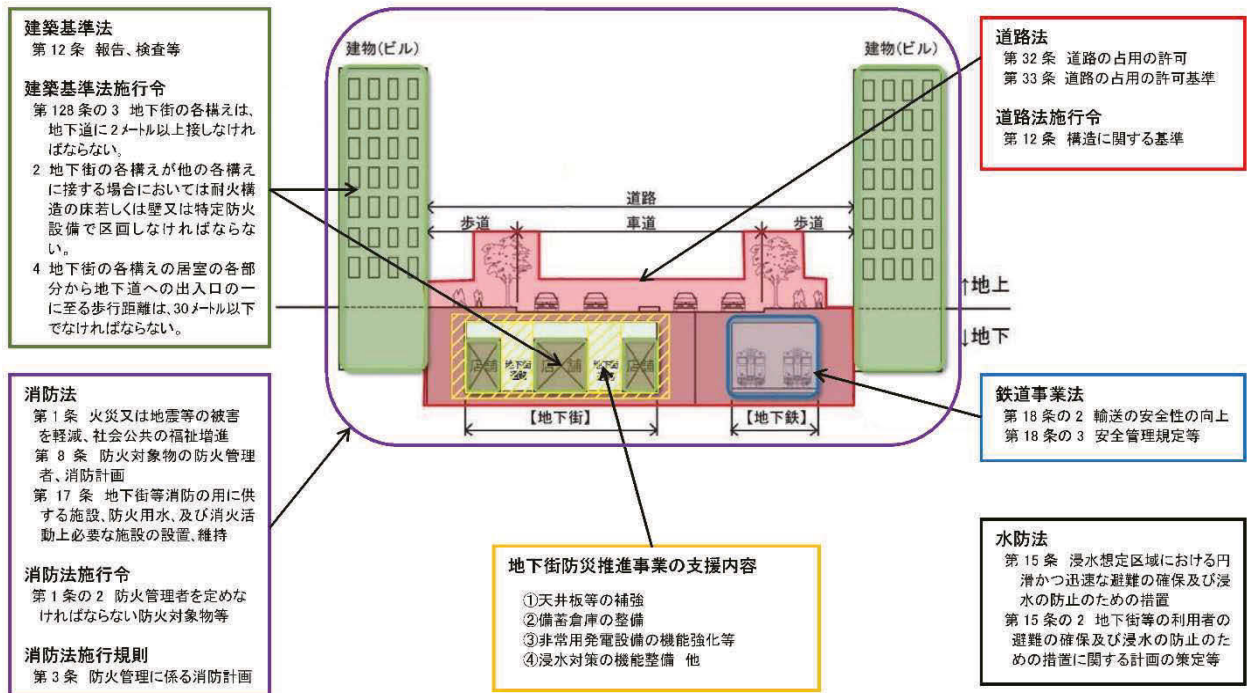


図 5.2.3-2 地下街に適用される主な法令など

出典：国土交通省⁶⁾

5.2.4 課題

多目的型地下インフラの利用において、「任意の複数の利用目的（用途）を満足する地下空間の規模・形状、連続性、構築場所、設備の設置、維持管理・更新、関連法規など」の事項を挙げた。これらの観点からの各課題について考える。

(1) 避難時の課題

地下空間の連続性が確保されることで、異なる用途や機能が調和して共存し、効果的に運用される。しかし、地下空間の利用が多様化し、人々の利用が増加する中で、緊急時の避難に関する課題が浮き彫りになる。

まず、地下空間における避難経路と避難場所の確保が重要である。地下鉄駅や地下商店街などの地下空間では、多くの人々が利用し、緊急時には円滑な避難経路が確保されている必要がある。また、避難場所も適切に設定され、避難者が安全かつ効果的に避難できるように配慮されるべきである。このように、本来は地下空間の規模や形状に応じて、避難経路や避難場所が設計されるべきである。

次に、避難誘導の重要性があげられる。地下空間では通常の建物とは異なり、地上との連携や外部からの情報伝達が難しい場合がある。そのため、緊急時には適切な避難誘導が必要となる。避難誘導のための避難経路の表示や案内システムの整備、非常用照明の設置などが考えられる。また、地下空間における避難誘導計画、緊急時対応と避難計画の策定が重要である。緊急時に迅速かつ適切な対応が行える組織体制を整えることが肝要であると言える。

一方で避難訓練と安全教育も重要な課題と言える。地下空間を利用する多くの人々に

対し、避難訓練や安全教育を実施することで、緊急時に適切な行動が取れるようにする必要がある。特に地下空間では、地上とは異なる環境やリスクが存在するため、地下空間における避難訓練や安全教育が重要となる。

以上の課題を踏まえると、地下空間における避難時の課題は多岐にわたることがわかる。地下空間における避難経路や避難場所の確保、避難誘導、緊急時の対応と避難計画の策定、避難訓練と安全教育が重要な課題であり、これらの課題に対処するためには、地下空間の特性を踏まえた適切な対策が求められる。

(2) 設備に関わる課題

地下空間の設備に関わる課題は、排水設備、通気設備、備蓄資材、電力確保などが挙げられる。これらの要素は地下空間の機能性、安全性、快適性に直結し、適切な設計と維持管理が求められる。

排水設備について、地下空間では地下水位や降雨による浸水のリスクがある。そのため、適切な排水設備が必要となる。排水設備の不備やメンテナンス不足により、地下空間が浸水すると、利用者の安全が脅かされるだけでなく、設備や備蓄資材にも被害が及ぶこととなる。また、地下空間の排水設備は地上とは異なる特性を持つため、地下空間の状況に合わせた設計と定期的な点検・保守が重要である。

通気設備について、地下空間では十分な通気が確保されていなければ、酸欠や有害ガスの蓄積などのリスクが発生する。特に非常時においては、通気設備が十分に機能することが利用者の生命を守るために不可欠である。

備蓄資材に関する課題も重要と言える。地下空間では非常時に備えて、食料、飲料水、医薬品、非常用発電機などの備蓄資材が必要である。これらの備蓄資材は、地下空間の利用者が安全かつ快適に避難生活を送るために不可欠である。しかし、備蓄資材の管理や更新が怠られると、非常時において必要な資材が不足する可能性がある。そのため、備蓄資材の適切な管理と定期的な更新が求められると言える。

最後に、電力確保は最も重要な課題と考える。地下空間では、照明や通信設備、換気設備、非常用設備など、様々な設備が電力を必要とする。特に非常時においては、電力が確保されていなければ、避難者の安全や情報伝達が困難になる。そのため、地下空間では電力確保のためのバックアップシステムや非常用発電機などが必要である。

以上のように、排水設備、通気設備、備蓄資材、電力確保などの設備に関わる課題は、地下空間の機能性、安全性、快適性に直結し、適切な設計と維持管理が求められる。これらの課題に対処するためには、専門家の知見を活用した適切な設計と、定期的な点検・保守が欠かせない。また、地下空間の利用者に対しては、安全教育や避難訓練を通じて、非常時に備える意識を高めることも重要である。

(3) 衛生面やストレスに関する課題

地下空間における衛生面やストレスに関わる課題について考える。地下空間における衛生環境やストレスフリーな環境整備は、地下空間を長期間利用する際に重要な要素となる。特に、地下空間におけるトイレ、入浴・シャワーなどの設備は、心理的ストレスの軽減にも貢献する。

衛生環境に関する課題について、地下空間では、通気設備や排水設備の整備が重要である。通気設備は、地下空間内の空気の循環を確保し、新鮮な空気を供給することで、閉鎖的な空間による空気の悪化を防ぐことができる。また、排水設備は、地下空間内の水の排出を効率的に行い、地下空間内の衛生環境を維持するために不可欠である。これらの設備の整備が不十分な場合、地下空間内での衛生環境が悪化し、利用者の健康リスクが高まる可能性がある。

地下空間のストレスフリーな環境整備においては、自然光の取り込みが難しいため、照明設備の充実が重要となる。十分な照明が確保されていないと、利用者はストレスを感じやすくなる。また、地下空間内における心理的ストレスの軽減のためには、開放的な空間や緑化、アートやデザインの活用などが考えられる。これにより、地下空間内でのストレスを軽減し、利用者の快適な空間を提供できる。

以上のように、地下空間における衛生環境やストレスに関わる課題は、通気設備や排水設備、照明設備、心理的ストレスの軽減、トイレや入浴、シャワーの設備、そして電力確保など、様々な要素が関わっている。

これらの課題を解決するためには、地下空間の設備計画や運用計画において、これらの要素を総合的に考慮し、適切な対策を講じることが重要である。また、地下空間の利用者に対する安全教育や訓練も重要であり、緊急時における適切な対応を確保するために必要となる。

(4) 法規に関する課題

地下空間利用に係る法令には、いくつかの課題がある。まず、地下空間の改良に取り組む際に、建設時に適用された法令が改正されることで、既存の地下空間が不適合となる場合である。これにより、大規模な改修が必要となり、新たな改良や設備更新が困難になる。また、地下空間と地上の接続に関しても、過去の地下火災の教訓から厳しい規制があり、円滑な接続形態を作り出しにくい場合もある。

さらに、地下空間を利用する際には、不特定多数の人々が利用することから、災害が発生した際の避難が地上に比べて物理的にも心理的にも困難となる場合がある。このような状況下で安全性を確保するには、十分な消防・防災の構えが必要となるが、地上に比べ地下空間を再構築することは容易ではない。したがって、地下空間の改修や改良に対する法令や基準の適用に当たっては、安全検証を行うことなどにより、弾力的な運用ができないか検討が望まれる。

現在の地下空間には、施設ごとに異なる監督行政庁や適用法令、規制基準、指導、許認可手続きが存在しており、各施設共通に拠り所となる基本的な法令が存在しない。しかし、このような異なる地下空間施設がネットワーク化され、都市活動を支える重要な基盤施設となっているのが現状である。したがって、地下空間利用の各施設共通に拠り所となる基本法令について、関係者による検討が望まれる。

以上のように、地下空間利用に係る法令には、改修や改良、安全確保、施設間の連携、情報管理など、さまざまな課題が存在している。これらの課題に対処するためには、法令の見直しや統一的な基準の整備、情報管理の効率化などが必要である。

多目的型地下インフラの利用において、インフラ自体の構築・再構築技術は欠かせない。そこで、多目的型地下インフラの構築・再構築技術において考えておくべき課題をいくつか述べておく。

地下インフラの構築・再構築を考える上で、耐久性の確保、止水性の維持、ひび割れの防止、防食・防錆、そして耐震設計は重要な要素である。耐久性の低下は漏水や有害物質により促進され、劣化原因が複雑に関連しているため、環境条件や機能に応じた耐久性能の検討が重要である。また、漏水による鉄筋や鋼材の腐食を防ぐために止水対策が必要で、ひび割れの防止や防食・防錆対策も重要となる。さらに、耐震設計では地震動に対する構造物の挙動を考慮し、適切な解析手法を用いて地震動のレベルに応じた耐震性能を決定、設計に反映されるべきである。

【参考文献】

- 1) (一社)中之島まちみらい協議会：中之島まちみらいビジョン（参照 2023.12）
https://nakanoshima-style.com/wp/wp-content/uploads/2023/04/pdf/vision_city_2023_03.pdf
- 2) 兵庫県神戸市：国民保護に係る緊急一時避難施設の追加（参照 2023.10）
<https://www.city.kobe.lg.jp/a96681/987582853644.html>
- 3) 岸井隆幸：地下空間の利活用，電気設備学会誌,Vol.32, No.7, pp.455-458, 2012.7
- 4) 大沢昌玄：地下空間利用の実態と計画的な位置づけ，浸水被害軽減に向けた地下空間活用勉強会，2023.5.30
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chika_benkyoukai/dai02kai/dai02kai_siryou2-1.pdf
- 5) (一財)エンジニアリング協会：地下空間利用ガイドブック 2013，2013.4.15
- 6) 国土交通省：地下街の安心避難対策ガイドライン（資料編 1）（参照 2023.10）
<https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001352063.pdf>
- 7) 衆議院 HP：大深度地下の公共的使用に関する特別措置法（参照 2023.10）
https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_housei.nsf/html/housei/h147087.htm

5.3 多目的地下インフラの構築・再構築技術

5.3.1 構造例

(1) 地下インフラの構造分類

地下インフラは、商業・生活関連、交通、都市再開発、都市エネルギー、防災・環境対策、文化施設・実験施設など多様な目的に使用されている。そのため地下インフラは、その用途や目的に応じて様々な構造があり、また構築箇所の施工条件（構造物の大きさや形状、深度、適用地質など）によって最適な構築技術が選定される。

主な構築技術には、大別すると①シールド工法、②山岳工法、③開削工法の方法があり、特殊な方法として推進工法、外殻先行型トンネル構築工法、沈埋工法などがある。

構築技術については「5.3.2 構築・再構築技術例」で紹介する。

1) 地下インフラの構造

主な構築技術別の構造物の基本形状や施工条件を表 5.3.1-1 に示す。

表 5.3.1-1 構造技術別地下インフラの基本形状および施工条件

	①シールド工法	②山岳工法	③開削工法
適用地質	非常に軟弱な沖積層から、洪積層や、新第三紀の軟岩までの地盤に適用される。	硬岩から新第三紀の軟岩までの地盤に適用される。	基本的に地質による制限はない。
地山条件等の変化への対応性	比較的容易。	支保工、掘削工法、補助工法の変更により対応可能。	地質に適用した土留め工、補助工法等を選定することで対応可能。
地下水対策	密閉型シールドでは、発進部および到達部を除いて、一般には補助工法を必要としない。	切羽等の安定性に影響がある場合は、地盤注入等による止水、ディープウェル等の補助工法が必要になる。	土留め壁の根入れを深くしたり、地下水位低下工法や地盤改良等の補助工法が必要となる場合が多い。
トンネル深度	最小土被りは、一般には1.0～1.5D（D:シールド外径）といわれている。 最大深度の実績は岩盤で約200m（当時水圧0.69MPa）、砂質土等の未固結地盤では100m以下の実績が多い。	未固結地山では、土被り／トンネル径比（H/D）が小さい場合、天端崩落や沈下を抑制する有効な補助工法が必要。 山岳部では約1,200mの深度で適用事例あり。	施工上、最小土被りによる制限はない。 最大深度は、40m程度の実績が多いが、それ以上となる大深度の施工実績も増加している。
断面形状	円形が標準である。 特殊シールド機を用いて複円形、楕円形、矩形等も可能。	掘削断面天端部にアーチ形状を有することを原則とする。 その限りでは、かなりの程度まで自由な断面で施工可能。	矩形が一般的であるが、複雑な形状にも対応できる。
断面の大きさ	トンネル外径の実績は、最大で17m程度である。	一般には150㎡程度までの事例が多く、370㎡程度の実績もある。	断面の大きさおよびその変化に対して、施工上からの制限はない。

出典：土木学会 1) 2) 3)

2) 設計手法

トンネル標準示方書各編を題材として、設計手法について以下に述べる。

a) シールド工法

シールド工法は、泥土あるいは泥水などで切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながら、シールドを掘進させ、セグメントを組み立てて地山を保持し、トンネルを構築する工法である。

シールド工法によって構築される構造物では、2006年制定のトンネル標準示方書【シールド工法編】・同解説からその主構造物であるセグメントの設計に対して許容応力度設計法と限界状態設計法を併記し、その設計においていずれの照査方法を採用することも可能となっている。一般的な設計ではセグメントの耐荷性能や耐久性などを個別基準などに準拠して照査しているのが実態である。

b) 山岳工法

山岳工法は、トンネル周辺地山の支保機能を有効に活用し、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工などにより地山の安定を確保して掘進する工法である。

山岳工法によって構築される構造物では、地山が本来保有する支保機能が最大限発揮されるように設計および施工を行わなければならない。支保工、覆工およびインバートの設計は、一般に各事業者の施工実績に基づく「標準設計の適用」で行われる。一般的に標準設計の適用にあたり、まず事前地質調査結果に基づき地山分類がなされ、地山等級を特定する。次に地山等級に応じた標準的な支保パターンや覆工およびインバートの構造を決定し、これを当初設計として施工計画や工程計画、積算などを行う。施工段階では、施工中の詳細な切羽観察と計測管理により地山および支保部材の安定を確認するとともに、その結果を支保工、覆工およびインバートの設計に反映し、トンネルの地質条件と施工条件に適合する構造を構築していくことになる。

c) 開削工法

開削工法は、地表面から土留め工を施しながら掘削を行い、所定の位置に構造物を築造して、その上部を埋め戻し、地表面を復旧する工法である。

開削工法によって構築される構造物では 2006年制定のトンネル標準示方書【開削工法編】・同解説から限界状態設計法を取り込んでおり、2016年制定においては「性能規定」の枠組みとし、基本的にはコンクリート標準示方書と同レベルの体系であるといえる。一方、各事業者が定めた個別基準には許容応力度設計法を用いる方法もある。

(2) 地下インフラの構造の現状と課題

1) 地下インフラ構造の現状

地下インフラ構造は、その耐久性の高さから鉄筋コンクリート構造が選定されることが多い。他には、シールド工法における急曲線では鋼製セグメントの内側に現場打ちコンクリートなどを巻き立てるケースや、地山の支保機能が期待できる山岳トンネルでは無筋コンクリートで覆工を仕上げるケースがある。

用途に応じて形状や大きさも様々であり、複数の用途が求められる構造物ほど複雑

化する傾向がある。

2) 地下インフラ構造の課題

地下インフラにおける鉄筋コンクリート構造物の課題を以下に示す。

a) 耐久性の確保

長期にわたる供用中に構造物の所要の耐久性が低下すると、トンネルの用途に応じた使用性や構造上の安全性など、構造物の機能に影響を与える。

耐久性の低下は、地下インフラの用途によって異なるが、おもに構造物内への漏水や有害物質への暴露などにより促進され、鉄筋コンクリートを形成する鋼材やコンクリートなどが劣化することによって起こる。劣化要因には、中性化、塩化物イオンの浸入、硫化水素などによる化学的腐食、内部の摩耗などの物理的な損傷などがあげられる。しかしながら、地下インフラの用途に応じてその使用環境が異なり、各種の劣化原因が複雑に関連していることから、現状では劣化のメカニズムが十分に解明されているとはいえない。環境条件やその有すべき機能に応じて、劣化原因を推定するとともに、要因に応じて耐久性能の検討を行うことが重要である。

b) 止水性の維持

工事中の施工性、完成後の使用目的および地山の脱水による地中や地表への影響（圧密沈下）などを考慮すると、構造物内への漏水を防止することは重要である。

構造物内への漏水は、コンクリート構造物の劣化を早め、その耐久性を損なう原因となるので十分な配慮が必要である。漏水により、漏水経路の鉄筋や鋼材の腐食を促進する場合があるので注意が必要である。地下水に塩分や有害物質が含まれる場合には、漏水すると鉄筋や鋼材への腐食の影響が著しく大きくなること、坑内環境に悪影響を与える可能性があることから、止水対策に十分に留意する必要がある。

c) ひび割れの防止

地下インフラ構造物に発生するひび割れは、水密性の低下や漏水ならびにそれに伴う鉄筋の腐食により、覆工の耐久性を低下させる原因となる。特に乾湿が繰り返される環境条件下や作用荷重が大きいなどの理由でひび割れが発生しやすいコンクリート構造物では、供用期間中の機能および使用目的などを損なわないように、適切な方法によりひび割れについて検討しなければならない。

d) 防食および防錆

鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリートの劣化は、中性化、塩害、凍害によるものや、酸性物質、硫酸イオンなどによる化学的腐食、アルカリ骨材反応などがある。したがって、これらの要因やトンネルのおかれる環境、用途を考慮し、適切な防食の処理や対策を検討する必要がある。特に、硫化物イオンに起因するコンクリートの腐食に関しては、かぶり部分だけの処理では十分な防食機能を果たせないことも考えられるため、内面に防食被覆を施すこともある。

e) 耐震設計

シールドトンネルをはじめ地中構造物は地震動に対しほとんど共振せず、その挙動は周辺地盤の変位や変形によって支配される。したがって耐震設計では、構造特性、周辺地盤の特性、設計地震動などの条件を適切に反映させ、応答値が必要な精

度で得られる解析手法を用いることが重要である。

シールドトンネルの耐震設計では、構造物の設計耐用期間内に数回発生する大きさのレベル1地震動と構造物の設計耐用期間中に発生する確率が極めて小さいが強いレベル2地震動を選択することが多い。耐震性能としては、用地、重要度、利用状況、機能停止が与える影響、陥没や出水などの二次災害の可能性、修復に要する時間や費用などを考慮して決定する必要がある。レベル1地震動に対しては許容応力度設計法で、レベル2地震動に対しては、部材の塑性化を考慮できる限界状態設計法により行われる事例が増えている。

5.3.2 構築・再構築技術例

多様な目的で使用されている地下インフラの構築・再構築技術について、主な施工方法の概要を紹介する。

(1) 構築・再構築技術の分類

地下インフラ構築の主な施工方法について、シールド工法、山岳工法、開削工法の概要を紹介する。

1) シールド工法

シールド工法は、泥土あるいは泥水などで切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながら、シールドマシンを掘進させ、セグメントを組み立てて地山を保持しながら再度掘進し、トンネルを構築する工法である。密閉型シールド工法は、大別して土圧式シールドと泥水式シールドがある。

土圧式シールドは、掘削土砂を泥土化させて所定の圧力を与えることで切羽の安定を図る。泥土化させるための添加材の注入装置の有無により、土圧シールドと泥土圧シールドに分類される。泥土圧シールドは、軟弱な沖積地盤や硬い洪積地盤、硬軟地盤の互層地盤など適用範囲が広いことから、現在では泥土圧シールドが採用される場合が多い。高水圧地盤において、スクリーコンベアのみでは対応できない場合があるため、スクリーコンベアの延長、圧送ポンプ設備、掘削土砂の土質性状の改良などを行う必要がある。

泥水式シールドは、チャンバー内に泥水を送水して切羽に作用する土水圧より高めの泥水圧を与えることで切羽の安定を図る。緩く柔らかい地層や含水比が高い状態などの切羽が安定しない場合、地下水が多い場合、湧水による地盤崩壊が想定される場合などの土質に適する工法である。透水性の高い地盤や巨石地盤では泥水が逸走して切羽の安定確保が困難となる場合があるため、泥水性状の変更や補助工法の採用などを行う場合がある。

2) 山岳工法

山岳工法は、トンネル周辺地山の支保機能を有効活用し、吹付けコンクリートやロックボルト、鋼製支保工などにより地山の安定を確保して掘進する工法である。周辺地山のグラウンドアーチが形成されること、掘削時の切羽の安定が確保されることが前提であり、それらが確保されない場合には補助工法が必要である。通常採用されて

いる掘削工法は、全断面工法、補助ベンチ付き全断面工法、ベンチカット工法、導坑先進工法である。大断面や都市域のトンネルでは、中壁分割工法も採用される場合がある。

掘削方式は、発破、機械、発破と機械の併用などがある。一般的には地山条件に着目して決定されるが、延長や断面形状、掘削工法、周辺影響などを考慮して、掘進長やずり出し計画、掘削作業の手順を決定する。発破掘削は、硬岩から中硬岩の地山に適用される。機械掘削は、中硬岩から未固結地山に適用される。硬岩から中硬岩の地山で、ある程度の延長がある場合は、TBMによる掘削が採用される時もある。

3) 開削工法

開削工法は、地表面から土留工（土留壁と土留支保工）を施工しながら掘削を行い、所定の位置に構造物を構築して、その上部を埋戻し地表面を復旧する工法である。代表的な土留壁構造は、親杭横矢板土留壁、鋼矢板土留壁である。掘削深さが深くなる場合や土留壁の変形量を抑制したい場合などは、地下連続壁（ソイルセメント地下連続壁、鉄筋コンクリート地下連続壁、鋼製地下連続壁など）の適用が検討される。

土留壁の選定は、地盤条件や開削規模、周辺環境などを踏まえて、施工性や経済性を考慮して行われる。最近では、都市部において、土留壁の変形や地下水位低下に伴う周辺地盤の沈下などの影響を優先して土留壁の選定が行われることが多い。

代表的な土留支保工は、鋼製切梁支保工である。切梁支保工の水平設置間隔は 3～5m 程度であるが、最近では大スパン（9m 程度）で適用可能な高剛性かつ高強度の切梁支保工の採用事例もある。掘削深さが深く平面的に大規模な場合、土留壁の変形を抑制したい場合は、逆巻工法の適用も検討される。

(2) 構築・再構築技術の現状と課題

1) シールド工法

シールド工法は工事の基点としての立坑が必要となるが、立坑の構築速度はシールドの掘進速度に比較すると著しく遅く、工期への影響が大きい。特に大深度の場合は工期への影響は顕著であるため、シールドトンネルの長距離化技術が重要となる。立坑を少なくすることはコスト縮減、周辺環境に及ぼす影響の軽減にもつながる。

また、高速施工技術を導入することにより、工期短縮が図られ、周辺地域の環境に及ぼす期間の短縮が可能となる。施工速度を上げる方法として、マシンの掘進速度を上げる方法とセグメント組立て時間を短縮する方法が考えられるが、作業サイクルに占める各作業の割合はセグメント組立てが最も大きいため、セグメント組立て時間を短縮することが効果的である。

シールド工事における自動化・無人化技術は、マシンの姿勢および位置の制御、セグメントの組立て、セグメント搬送など主要作業の自動化は達成されている。しかし、少子・高齢化による労働力や熟練者の不足、大深度掘削による高水圧下での作業環境への対応などから、人力による作業のさらなる自動化・無人化が望まれる。

2) 山岳工法

都市部における山岳工法では機械掘削を基本とし、地山条件や立地条件などを考慮して適切な施工法を選定する必要がある。また、坑内外の様々な観察や計測結果を施工の各段階と関連付けて一元管理を行い、迅速に施工に反映するなど情報化施工を基本とする。施工方法において、最も留意すべき点は掘削時の切羽安定である。通常の上岳トンネル工法と比べて立地条件や地山条件が厳しく、環境保全や安全監視の面で細心の配慮が必要となる。

生活環境の対策が重要であり、ずりの積み込みや運搬、施工機械や工事用設備の稼働に対する騒音対策や振動対策、地下水位の低下による湧水の発生や周辺の水利用に対する湧水対策、トンネル掘削に伴う地山の緩みに対する地表面沈下対策を行う必要がある。

覆工やインバートの施工について、覆工は内空変位が収束した後に早期に施工すること、インバートは近接構造物がある場合や地下水位が高い未固結地山において切羽からインバートの施工位置を短くしインバート掘削後は早期に全断面を閉合する必要がある。

3) 開削工法

鋼杭や鋼矢板の施工において、地下埋設物や地上施設の防護、露出させた地下埋設物を損傷させないように注意する必要がある。

ソイルセメント地下連続壁の施工において、鋼杭や鋼矢板の注意点の他に、鉛直精度や施工順序に対する注意を怠ると、壁面に不陸が生じて躯体施工に支障をきたしたり、杭間に隙間が生じて漏水したり、掘削の際に土留め壁背面側に変状を及ぼす懸念があるため、留意する必要がある。

安定液を用いる地下連続壁（鉄筋コンクリート地下連続壁、鋼製地下連続壁など）の施工において、安定液は溝壁の崩壊防止、逸水防止、溝内土砂の流動化による掘削効率の向上の役割を果たすため、安定液の比重や粘性、pH、水位などの管理を行う必要がある。コンクリート打設中に鉄筋かごや鋼製エレメントが移動しないような処置を行う必要がある。また、安定液中の浮遊土が沈殿するため、このスライムを確実に除去しなければ、壁体下端支持力の低下やコンクリート強度の低下などの原因となる。

補助工法（地下水位低下工法、深層混合処理工法、浅層混合処理工法、薬液注入工法、凍結工法など）を採用する場合は、施工法、地盤条件や周辺環境などを考慮して、工法選定や併用する必要がある。

【参考文献】

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書【シールド工法編】・同解説，2016，発行
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書【山岳工法編】・同解説，2016，発行
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書【開削工法編】・同解説，2016，発行

5.4 今後の課題

第4部会では「地下インフラモジュールの基本構造と構築技術に関する調査研究」というテーマに対し、「地下空間を経済的、効率的に利用するために、多目的に人流、物流、備蓄、避難などに対応できる（大深度）地下インフラを構想する」ということを行った。

本調査研究での「多目的型地下インフラモジュール」とは、「複数の用途を有する多機能な地下施設を含む不特定多数が利用する社会基盤施設」と定義することにより調査対象範囲を明確にした。

第2章では要求性能、関連法規などの基礎情報を収集することにより調査の方向性を定めた。さらに具体的な多目的インフラ事例について国内3例、海外3例を調査することにより理解を深めた。調査を進める中で地下インフラへの避難のハード面だけでなく、ソフト面での課題が浮き彫りになった。例えば、避難訓練や安全教育という一般市民の意識の問題、衛生面や心理的ストレスのような避難時の環境整備さらに複雑に入り組んだ関連法規の実際の運用の問題である。

第3章では次のステップとして、構築・再構築技術の調査を行った。まず構造に関する調査を行うべく、各種インフラ構造物の構造形式による分類を行い、設計手法を調査した。これには体系的にまとめられているトンネル標準示方書各編（（公財）土木学会）を参考にし、その特徴をまとめた。また構造物の構築やリニューアルを含む再構築の技術を調査し、課題を整理した。各種施工方法はいずれも実績豊富な確立されたものであるが、それぞれ固有の課題が残っていることが分かった。

本年度は以下の5か所へのヒアリング・現地調査を行った。各施設では本来の目的以外の用途での多目的な利用がなされているかなどのヒアリング他、歴史、建設経緯、事業計画、運用状況、行政方針、地元協議、課題などの広い情報が収集できた。

- ・大谷石採掘場跡地
- ・首都圏外郭放水路
- ・神戸市三宮周辺の地下施設
- ・寝屋川北部地下河川
- ・阪神高速淀川左岸線（2期）工事

2022年2月のロシアのウクライナ侵攻に始まり、2023年10月にはイスラエルのガザ地区侵攻が始まり、武力紛争に発展しており、2023年12月時点では沈静化に至っていない。これらの紛争の報道の中で地下施設のことが報じられており、例えばガザ地区の病院地下にはテロ組織の拠点、トンネルが避難施設として利用されているとのことである。まさに我々が調査を行ってきた多目的型地下インフラモジュールに該当する。

次年度では、本年度の他部会の成果を踏まえて、今後の地下インフラ構築および再構築（既設インフラの転用）のモデルとして、シェルター施設を意識した多目的型の地下インフラモジュールの提案を目標として調査を継続的に行っていく予定である。

書名 2023年度(2023M-169)
多目的型地下インフラモデルの調査研究報告書(概要版)

発行 2024年(令和6年)3月
一般財団法人 エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター
〒106-0041
東京都港区麻布台1-11-9(BPRプレイス神谷町9階)
TEL 03-6441-2910(代表)
FAX 03-6441-2942

印刷 服部プロセス株式会社