

提言

発電以外の原子力利用の将来のあり方について



平成26年（2014年）9月26日

日本学術会議

原子力利用の将来像についての検討委員会

原子力学の将来検討分科会

この提言は日本学術会議 原子力利用の将来像についての検討委員会原子力学の将来検討分科会の審議結果をとりまとめ公表するものである。

日本学術会議 原子力利用の将来像についての検討委員会
原子力学の将来検討分科会

委員長	家 泰弘	(第三部会員)	東京大学物性研究所教授
副委員長	春日 文子	(第二部会員)	国立医薬品食品衛生研究所安全情報部長
幹 事	中嶋 英雄	(第三部会員)	公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 所長
幹 事	横山 広美	(特任連携会員)	東京大学大学院理学系研究科准教授
	佐藤 学	(第一部会員)	学習院大学文学部教授
	山本 正幸	(第二部会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構副機 構長・基礎生物学研究所所長
	大西 隆	(第三部会員)	豊橋技術科学大学学長、東京大学名誉教授
	加藤 幾芳	(連携会員)	北海道大学名誉教授
	柴田 徳思	(連携会員)	公益社団法人日本アイソトープ協会専務理事
	中西 友子	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授

(平成 26 年 3 月まで)

本提言及び参考資料の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

米倉 義晴	(第二部会員)	独立行政法人放射線医学総合研究所理事長
中島 健		京都大学原子炉実験所教授
小野 公二		京都大学原子炉実験所教授
北村 正晴		東北大学名誉教授

本提言の作成に際して、以下の職員が事務及び調査を担当した

事務	盛田 謙二	参事官 (審議第二担当)
	斎田 豊	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐 (平成 26 年 8 月まで)
	松宮 志麻	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐 (平成 26 年 8 月から)
	沖山 清観	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職 (平成 26 年 7 月)
調査	衛藤 基邦	上席学術調査員

要 旨

1 作成の背景

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の深刻な事故は、我が国の原子力利用のあり方の全面的な再検討を迫っている。第 22 期日本学術会議では「原子力利用の将来像についての検討委員会」を設置して、学術的観点から原子力利用の将来像の検討を行うこととした。同検討委員会のもとには「原子力発電の将来検討分科会」及び「原子力学の将来検討分科会」(本分科会) という 2 つの分科会を設置し、原子力利用に関わる諸検討課題のうち、エネルギー源としての原子力利用(原子力発電)に関わるものを前者が、それ以外のものを本分科会が扱うこととした。本分科会では、発電以外の原子力利用の現状と展望、研究用原子炉(研究炉)や加速器ベース量子ビーム施設の研究開発における役割及び管理運営における安全性確保と地域コミュニティとの対話、原子力関連分野の人材育成、原子力利用研究開発の方向性、等の事項について調査審議を行い、本提言を取りまとめた。

2 現状及び課題

原子力の利用には放射線やラジオアイソトープ(RI)の利用も含まれ、それらは基礎科学、医療応用、農業・工業分野での産業応用など多岐にわたっている。原子力は多くの高い利用価値を有する一方、その莫大な内包エネルギーや放射線の生体影響に由来するリスクも有している。エネルギー源としての原子力利用(原子力発電)については、火力(化石燃料)、水力、風力、潮力、地熱、太陽光など、他のエネルギー源との多面的な比較に基づく選択がなされるべきであろう。一方、本提言において論じる「発電以外の原子力利用」は、同じ利用目的を放射線や RI を用いずに代替することが原理的に不可能なものが少なくない。このことから、将来にわたる放射線・RI 利用の推進について、総論として国民の支持は得られるものと考えられる。課題は、使い方によっては生体や環境に影響を及ぼす可能性を秘めた放射線・RI をいかに安全かつ有効に使うか、という点にある。特に、原子力利用研究開発の基盤施設である研究炉や加速器の建設及び管理運営は、地域コミュニティとの対話による共通理解の上になされなければならない。

3 提言の内容

(1) 原子力利用の多面性の周知と放射線・RI に関する科学的知識の普及

原子力が発電以外の多様な分野で広く利用されているという事実がより広く国民に認識されるよう、原子力関連分野の科学者はこれまでも増して情報発信に努めるべきである。物理学の基礎研究から医療・診断、品種改良、食品処理、材料開発、などの応用にいたる広範な分野における放射線・RI の役割とその社会的意義の認識の普及と、環境における放射性物質のふるまいや放射線の生体影響に関する科学的知識の普及は、原子力利用のあり方をめぐる対話の基礎となるべきものである。

(2) 放射線・RI 利用研究開発の推進

物理科学の基礎研究に必要な不可欠なツールとして開発されてきた高エネルギー量子ビームは、物質材料科学や生命科学においてもその有用性を証明し、さらには医療などの応用分野への展開を見せている。諸分野における放射線・RI 利用による新たな科学的知見の獲得や新技術の実現に向けた研究開発は今後とも強力に推進されるべきである。並行して、原子力利用の安全性を高める研究開発や、自然環境における放射性物質のふるまい及び放射線被ばくの中長期的影響の調査研究を進めることにより、原子力利用におけるリスクを低減する不断の努力も求められる。原子力関連分野の先端的研究や安全研究の推進に際しては、適切な情報交換のもとに国際連携で取り組むことが肝要である。

(3) 将来の原子力利用の諸相を俯瞰した人材育成

今後ますます広範な分野へと展開することが予想される放射線・RI・量子ビーム利用を開拓・推進する人材を多様な分野から育成していく必要がある。そのために、我が国における原子力利用の諸相（発電、及び、放射線・RI・量子ビーム利用）の将来展望に基づく計画的な人材育成が求められる。原子力関連分野の科学者は次世代を担う若者に多様な分野における原子力利用の役割と魅力を伝え、国はそれらの道を志す若者たちに将来の活躍の場に関する展望を示すべきである。原子炉に直接関わる人材・人員の将来的な総需要は原子力発電に関わる社会的選択に依存するが、仮に原子力発電からのフェーズアウト（段階的廃止）を選択する場合においても廃炉及び核廃棄物・放射性廃棄物処理を含む重要な課題に数十年スケールで取り組む人材が必要である。原子力のバックエンド問題を社会から見える形で位置付け、やり甲斐のある重要な仕事としてそれらに積極的に取り組む人材を計画的に育成していくことが求められる。また、我が国が原子力関連分野の人材育成に関して行ってきた国際貢献も強化すべきである。

(4) 研究用原子炉（研究炉）と加速器ベース中性子ビーム施設の役割分担

我が国における中性子利用は、長期的方向性としては、その主体を研究炉から加速器ベース量子ビーム施設に移して行くことが望ましい。しかしながら、定常ビームであることを必須とする実験や照射応用など、研究炉からの中性子の特徴が活きる分野もあることや、研究炉には原子力関連人材育成の場としての機能もあることから、適正規模の研究炉施設を維持・運営することが望まれる。既存の研究炉の高経年化の現状を踏まえ、国及び研究者は研究炉の将来のあり方の検討を急ぐべきである。その際に、より安全性の高い方式の原子炉への転換の検討もなされるべきである。

(5) 発電用原子炉（発電炉）と研究用原子炉（研究炉）の特性の違いを踏まえた合理的な安全規制と安全管理

福島原発事故の経験を踏まえて原子力規制・安全基準の見直しが行われた。発電用・研究用を問わず原子炉の安全性に関して十全の対策を施すべきであるのは当然として、研究炉と発電炉とでは出力規模やシステム設計が異なること等、リスクや特性の違いを

踏まえた合理的な安全規制がなされることが望まれる。原子力事業者においては安全性の確保に向けて、モニタリングや制御技術の向上に努めると共に、人間工学的な側面の安全研究も進めるべきである。

(6) 原子力関連研究施設の建設及び管理運営に関する対話と合意形成

医療応用等も含めた原子力利用の研究施設の必要性に関して総論的な支持は得られるものと考えられるが、実際に原子力関連の研究施設が設置される地域コミュニティ（周辺自治体）の理解はまた異なる次元の問題である。研究開発を遂行する研究者・技術者、原子力関連研究施設の管理運営責任者、及び規制に当たる国や自治体は、原子力研究施設の安全管理に十全の注意を払うと共に、適切な情報開示と対話を通じて市民との信頼関係を築き、それを維持しなければならない。施設の一般公開や地域活動・地域経済との交流・連携等を通じて、地域コミュニティに開かれた施設とすることが肝要である。

目 次

1	はじめに	1
2	原子力とその利用形態	4
	(1) エネルギー源としての利用	4
	(2) 放射線及びラジオ・アイソトープ(RI)の利用	4
3	我が国における原子力利用(エネルギー利用以外)の現状と課題	6
	(1) 放射線・RI・量子ビーム利用	6
	(2) 中・大型研究施設の役割と現状	10
	(3) 原子力利用と安全性確保のための技術開発	11
	(4) 原子力分野の教育と人材育成	14
4	提言	21
	(1) 原子力利用の多面性の周知と放射線・RIに関する科学的知識の普及	21
	(2) 放射線・RI 利用研究開発の推進	21
	(3) 将来の原子力利用の諸相を俯瞰した人材育成	21
	(4) 研究用原子炉と加速器ベース中性子ビーム施設の役割分担	22
	(5) 発電用原子炉と研究用原子炉の特性の違いを踏まえた合理的な安全規制と安全管理	22
	(6) 原子力関連研究施設の建設及び管理運営に関する対話と合意形成	22
	<参考文献>	23
	原子力利用の将来像についての検討委員会 原子力学の将来検討分科会 審議経過 ..	25

1 はじめに

19世紀末に、エックス(X)線(レントゲン 1895年)、ウランの放射能(ベクレル 1896年)、放射性元素:ポロニウム・ラジウム(キュリー夫妻 1898年)、アルファ(α)線・ベータ(β)線(ラザフォード 1898年)、ガンマ(γ)線(ヴィラール 1900年)といった発見が相次ぎ、原子核物理学が幕を開けた。X線はその発見直後からX線透過写真として医療診断に利用された。その後、X線回折による物質構造解析、X線分光による元素分析、高い透過性を利用した非破壊検査など、科学・技術の多くの分野における不可欠のツールとなった。後述するように、X線に限らず放射線やラジオ・アイソトープなど、原子核現象の利用は幅広い分野にわたっている。

1930年代に中性子の発見や、ウランの核分裂現象の発見があり、原子核物理学は新たな時代に入った。原子核反応に多量のエネルギーが伴うことが認識され、その潜在能力の利用可能性が追求されることとなった。原子力利用の歴史は、不幸なことに軍事研究が先行した。第二次世界大戦中に米国で進められたマンハッタン計画によって核分裂連鎖反応を利用する原子爆弾が開発され、広島・長崎に投下されて多くの人命を奪い歴史に汚点を残した。

戦後は冷戦時代を背景とした軍事研究としての核兵器や潜水艦動力用原子炉の開発の一方、1953年に米国のアイゼンハワー大統領が国連総会で行った演説「Atoms for Peace(原子力の平和利用)」を契機として原子力の平和利用に関する研究開発が本格的に開始された。原子炉内の制御核分裂反応を利用する商用原子力発電所の建設が1960年代から各国で進められた。1979年の米国スリーマイル島原子力発電所事故など、いくつかの原子力関連事故を契機とする見直しはあったものの、原子力エネルギー利用の推進という流れは続き、1980年代末には全世界で400基を超える発電用原子炉(発電炉)が稼働する状況に至った。1986年に旧ソ連(現在のウクライナ)のチェルノブイリ原子力発電所で起こった大規模事故以降、原子力発電所増設の動きは目立って鈍ったものの、21世紀に入って化石燃料への依存度低減や地球温暖化対策の観点から原子力発電の役割を再評価する動き(いわゆる「原子カルネサンス」)が見られた。

そのような状況下で、2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、「福島原発事故」と略記)が起こった。全電源喪失による冷却機能不全に陥って危機的な状態に立ち至り、周辺住民は緊急避難を余儀なくされた。緊急ベントや水素爆発によって環境に撒き散らされた大量の放射性物質は広域にわたる放射能汚染をもたらし、広範囲の地域にわたって今なお住民の生活や農林水産業に深刻な影を落としている。炉心損傷を起こした原子炉を安全な形で最終的な廃炉処理を達成するには、今後も長期にわたる作業が必要である。この苛酷事故を貴重な教訓として、我が国の原子力利用のあり方が根本的に問い直されることとなった。

原子力利用のあり方の再検討の前提として、我が国における原子力利用の歴史と日本学術会議の関わりを振り返る必要がある。日本学術会議は、原子力の平和利用に徹するという観点から、原子力研究と利用の公開、民主、自主の原則を求める声明を1954年に発

出している[1]。この考え方が、1955年に制定された原子力基本法に盛り込まれ、我が国における原子力利用の指針となった。1956年に日本原子力研究所（現・独立行政法人日本原子力研究開発機構）が特殊法人として設立され、茨城県那珂郡東海村に研究施設が設置された。1957年には、電気事業連合会加盟の9電力会社及び電源開発の出資により日本原子力発電株式会社が設立された。高度成長期のエネルギー需要の増大という背景があって、1960年代から各電力会社が、主に米国からの技術導入によって商業用原子力発電所の建設を進めた。我が国では2010年の時点において、17か所の原子力発電所で54基、4885万kWの発電炉が稼働していた。（東日本大震災後は状況が大きく変わり、本提言とりまとめ時点（平成26年8月）では、すべての発電炉が停止状態にある。）

このように、原子力発電は過去半世紀にわたって我が国の電力供給の一定割合を担い、社会インフラの一部をなしてきた。それはまた、原子力発電がある意味で”business-as-usual”となり、潜在するリスクや安全管理に関する意識の希薄化を招く要因ともなつたと考えられる。この間、スリーマイル島原子力発電所事故やチェルノブイリ原子力発電所事故など重大な原子力事故が海外で起きたにも関わらず、日本社会ではそれらを教訓として原子力利用の安全性を深く再検討することは行われなかった。日本学術会議も海外の事故事例をもとに改めて提言を发出することはなかった。東日本大震災及び福島原発事故を経験した現時点から見ると、そのことは学術コミュニティとしての感度不足及び社会的責任遂行不全であったと言わざるをえない。日本学術会議は、東日本大震災及び福島原発事故の検証と復旧・復興対策に関して様々な角度からの検討を行い、提言等を发出してきた[2-11]が、その議論を科学及び科学者の信頼性が失われたことへの反省から始めなければならなかった。その背景に、日本学術会議に代表される科学者コミュニティにおける原子力利用の安全問題への関心の希薄化があったことは否めない。

一方、後述するように、現代社会では発電以外にも様々な形での原子力利用が広範な分野において進められている。しかしながら、そのことは必ずしも広く国民に認識されておらず、発電以外の原子力利用のあり方に関して科学者と社会との間で十分な議論・検討が行われてきたとは言い難い。福島原発事故を機に原子力利用や放射線の影響に関する不安感が市民の間に高まったことを踏まえ、発電以外の原子力利用についても安全性確保の観点も含めてその現状と将来を検討することが求められている。

以上のような背景のもとに第22期の日本学術会議では「原子力利用の将来像についての検討委員会」を設置し、原子力の平和利用に関する日本学術会議としての考え方を総括すると共に、将来像について学術的観点からの検討結果を国民並びに世界に対して示すこととした。上記検討委員会のもとに、「原子力発電の将来検討分科会」と「原子力学の将来検討分科会」（本分科会）が設置され、原子力利用に関わる諸検討課題のうち、エネルギー源としての原子力利用（原子力発電）に関わるものを前者が、それ以外のものを本分科会が扱うこととした。なお、「原子力学」というのは必ずしも一般的な用語ではないと思われるが、文部科学省科学研究費補助金「系・分野・分科・細目表」の総合工学分科の中の細

目名として「原子力学」が使われている¹。また、「原子力工学」よりも広く「原子力に関連する学術」を表す言葉として使われた例がある[12]。本分科会の検討対象である「エネルギー利用以外の原子力利用」の基礎学理を表す言葉として「原子力学」を用いたものである。

¹ 文部科学省科学研究費補助金「系・分野・分科・細目表」の総合工学分科の中の細目「原子力学」に掲げられているキーワードは、(1)放射線工学、ビーム科学、(2)炉物理、核データ、(3)原子力計測、放射線物理、(4)熱流動、(5)構造、(6)システム設計、安全工学、(7)原子力材料、核燃料、(8)同位体、放射線化学、(9)燃料サイクル、(10)バックエンド、(11)新型原子炉、(12)保健物理、環境安全、(13)原子力社会環境、である。

2 原子力とその利用形態

原子力（原子核壊変や原子核反応に伴う諸現象）の利用形態には大きく分けて、

- ・原子核に内在する核エネルギーを源として発電等を行うエネルギー源としての利用、
- ・放射性同位元素（ラジオ・アイソトープ：RI）やその壊変に伴って発生する放射線、及び、加速器や原子炉によって作り出される量子ビームの利用、

という2つのカテゴリーがある。後者は、研究炉や加速器によって作り出される量子ビーム（粒子ビームや放射光）、RIから放射される放射線、小規模な発生装置によるX線や電子線など、装置の規模やビーム強度が極めて幅広く、種々の用途に利用される。

(1) エネルギー源としての利用

エネルギー源として利用し得る原子核反応には核融合反応と核分裂反応とがある。核融合反応は、重水素や三重水素などの軽い核種が融合してヘリウムなど、より安定な核種を形成する過程であり、太陽をはじめとする恒星の内部でエネルギーを生み出す基礎過程である。制御された形で核融合反応を実現してエネルギーを取り出すには高温・高密度のプラズマ状態を一定時間以上保持することが必要とされており²、磁気閉じ込め方式やレーザー核融合など、いくつかの方式が提案されている。国際プロジェクトとして建設中の国際熱核融合実験炉（ITER）はトカマク型の磁気閉じ込め方式である。核融合のエネルギー利用は、実証に向けた研究開発の段階にある。

一方、核分裂反応は、ウラン等の重い原子核が、より安定な軽い原子核に分裂する反応であり、その際に大きなエネルギーが放出される。ウラン等の核分裂物質がある程度以上の塊になると、核分裂の際に放出される中性子が周りの原子核に吸収されて新たな核分裂を引き起こす「連鎖反応」が起こる。連鎖反応による大量かつ瞬時のエネルギー解放が原子爆弾の原理にほかならない、連鎖反応を制御することにより、安定的・持続的にエネルギーを取り出すのが原子力のエネルギー利用、すなわち原子力発電である。

原子力発電は、化石燃料、水力、風力、潮力、バイオマス、地熱、太陽光などと共に、エネルギー選択肢の一つである。現在、我が国には発電炉が、17か所の原子力発電所に計54基存在する³が、福島原発事故以降、本稿執筆時点（平成26年7月）ではそれらすべてが停止状態にある。原子力発電所の増設計画の是非や、点検などによって停止した原子力発電所の再稼働の是非などが焦点となり、新たな安全基準の策定が行われた。

(2) 放射線及びラジオ・アイソトープ(RI)の利用

エネルギー源という観点以外の原子核現象の利用は多岐にわたる。その主役は放射線とラジオ・アイソトープである。

² 熱核融合とは原理的に異なる方式としてミュオン触媒核融合が提案されている。

³原子力規制委員会のホームページに原子力発電所の一覧がある。<http://www.nsr.go.jp/jimusho/>

放射線とは、高い運動エネルギーを持つ物質粒子（イオン、電子、中性子、陽子、中間子など）のビームや、高エネルギーの電磁波（ γ 線、X線）の総称である。放射線と物質との相互作用はその種類によって、①透過、②原子の励起や電離、③原子核反応、など様々である。ラジオ・アイソトープ（RI：放射性同位体）とは、安定核種とは異なり固有の寿命（半減期）をもって放射性壊変（放射性崩壊）する不安定核種を指す。壊変の際に放射線（ α 線、 β 線、 γ 線）が放出される。すべての元素には複数の同位体（アイソトープ）があり、通常安定（非放射性）核種のほかに放射性核種がある。それらの化学的性質は同じであるが、放射性核種はその特徴的な放射線により極微量でも高感度の検出が可能であるという著しい特徴を有する。ある不安定核が放射性壊変してできる核種を娘核種という。しばしば娘核種もまた放射性であるので、安定した原子核になるまで多段の放射性壊変が起こる。RIには自然界に存在するもの（天然放射性核種）もあるが、利用されているRIのほとんどは粒子加速器や原子炉を利用して核種変換することで製造される人工放射性核種である。

放射線やRIのこのような特徴は様々な分野において応用されている。電子線やX線は育種、食品処理、材料改質など様々な生産・加工現場において必須のツールであると共に、医療現場でもPET⁴検査などの放射線診断や放射線治療などに活用されている。また、生命科学から理学・工学にわたる幅広い分野の基礎研究において重要なツールとなっている。

RIの利用法としては、放射線源としての利用と、放射性物質に特有の高感度・高精度検出特性の利用とがある。放射線源としてのRIは、得られる放射線がそのRI固有のものに限られ、かつその放射強度が半減期に従って時間と共に減衰するといった制限はあるものの、一方では、独立（stand-alone）のコンパクトな放射線源であることや、特定の場所に組み込むことも可能であるといった特徴を有する。

放射性物質は極微量の存在であっても確実に検出・定量することができる。この性質に基づく物質の検出への応用として、医療関係ではシンチグラフィなどによる検査・診断が挙げられる。化学では、分子の一部を放射性同位体で標識（ラベル）することによって化学反応の詳細を調べる方法があり、特に生化学で盛んに用いられる。また生体高分子を標識してこれを検出する方法は、免疫学的検定やDNAの塩基配列決定などに応用される。

⁴ PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層法：陽電子検出を利用したコンピューター断層撮影技術。CTやMRIが主に組織の形態を観察するための検査法であるのに対し、PETは生体機能を観察することに適した検査法である。

3 我が国における原子力利用（エネルギー利用以外）の現状と課題

「はじめに」に記したように、本分科会では原子力利用の将来像に関する諸課題のうちエネルギー利用以外の原子力利用に関するものについて審議することとし、我が国の現状の分析を行った。

(1) 放射線・RI・量子ビーム利用

放射線（原子炉や加速器を用いて発生させる量子ビームを含む）やRIは医療、育種、材料開発など広い分野にわたって利用されている。以下に、各分野における応用例を示す。

① 医療・健康

冒頭にも述べたように、X線はその発見直後から骨折などの診断に用いられ、医療に革命をもたらした。胸部X線撮影による健康診断や歯科治療での利用をはじめ、X線画像診断装置は医療現場に必須の装置となっている。X線CT（コンピューター断層撮影法）など3次元画像を与える高度な診断装置も医療現場に広く普及している。PET（陽電子放射断層撮影法）は生体の機能に関わる選択的情報を与える。我が国の国民病と言われる癌は早期発見されれば高い治癒率なので、癌検診率の向上は重要な課題である。癌検診率は癌の種類にもよるが、平成19年度で12%（胃癌）から22%（肺癌）と低い水準に留まっている。癌などの疾患の早期発見に放射線診断は有効であり、放射線診断及びそのリスクについて国民の理解を深めることは健康社会の実現において重要である。

悪性腫瘍（癌細胞）を破壊するための放射線治療は広く行われている。用いる放射線は癌細胞の種類と組織部位によって、X線、 γ 線、電子線、陽子線、重粒子線、中性子線など多様である。放射線治療では、照射を受けた癌細胞のみならず周囲の正常細胞にも影響を与えてしまうため、いかにして癌細胞だけに放射線を照射するかが重要となる。近年、硼素中性子捕捉療法（BNCT: Boron Neutron Capture Therapy）が、細胞レベルで高い選択性を実現できる手法として期待されている[13]。

医療活動の重要なバックグラウンドとして医療器具の滅菌があるが、放射線（ γ 線、電子線）による滅菌は、熱処理や化学処理による方法と並んで広く利用されている。医療検査用の ^{99m}Tc （テクネシウム）の原料として重要な ^{99}Mo （モリブデン）は、世界の数基の原子炉で生産されており、我が国は全面的に輸入に依存している。 ^{99}Mo の安定供給のために中性子放射化法による国内での製造が望まれる。

② 農業・食品

農業・食品分野での放射線利用として、照射利用や突然変異育種がある。

照射利用としては、食品保存（殺菌、発芽抑制）、害虫駆除、滅菌などがある。馬鈴薯やタマネギの発芽組織は放射線の影響を受けやすく、他の組織はほとんど放射線

の影響を受けない。そこで放射線を利用することで、商品価値を落とさずに発芽を抑制することが可能である。食品への放射線照射は、各国が法律により対象品目、目的、線量などを規制している。我が国では馬鈴薯の発芽抑制に 150 Gy (グレイ) 以下の γ 線照射が認められており、1974 年から北海道の士幌農協で実施されている。その他に、外国では、香辛料類の殺菌、穀物や果実の発芽防止、肉や魚介類の殺菌などに放射線照射が利用されているケースがある。害虫駆除法の一つである不妊虫放飼法とは、放射線照射で不妊化したオスを野外に放し、野生のメスと交尾させることにより、その子孫を減らしていった最終的に根絶する手法である。我が国ではウリミバエやミカンコバエに対して適用され、ウリミバエの再侵入防止に現在も用いられ、イモゾウムシ等の害虫駆除の目的で研究が進められている。

突然変異育種は、突然変異を起こした個体の中から有用なものを選別していくことによって品種改良を行う手法であるが、自然の突然変異発生頻度は極めて低いため、放射線照射 (X 線、 γ 線、イオンビームなど) によって突然変異を人為的に促進することにより研究開発を加速するものである。我が国における突然変異育種による新品種は、イネ (「低アレルゲン米」や「低グルテリン米」など) や花卉類をはじめとして数多くの作物種にわたる。

植物機能の研究にも放射線や RI が利用されており、RI トレーサーによる植物の元素代謝の追跡や、放射線によるイメージングなどは広く用いられている。ポジトロン (陽電子) イメージングによりカドミウムがイネの根に吸収されコメに集積するまでの動態を定量的に解析した例もある [14]。

③ 工業生産

工業生産現場において放射線は様々な用途に用いられている。半導体分野では、電子線や X 線を利用したリソグラフィ (微細構造形成) やイオンビーム加工などは電子デバイスの製造に不可欠の技術である。シリコン半導体素子製造の基盤技術として大口径のシリコン (Si) 単結晶に不純物原子を均一にドーピングすることが要請され、中性子照射によるシリコン半導体へのリン (P) のドーピングはその有効な手法となっている。世界の総需要量は年間約 160 トンであり、このうち内需向けを目的とする中国での生産量 30 トンを除き、残りの 130 トンに対して我が国のシリコン製造メーカーの占める割合は約 70% (90 トン程度) にのぼる。このうち、日本国内で生産される中性子ドーピング・シリコンは、震災前 JRR-3 (Japan Research Reactor : 3 号炉) が運転されていた時点で年間 3.5 トンであった [15]。

ラジアルタイヤの製造において、ゴムに電子線を照射することによって架橋反応を生じさせ、粘着性を制御する手法は広く用いられている [16]。半導体デバイスや太陽電池に放射線照射試験を行うことで放射線による誤動作や劣化のメカニズムを解明し、放射線耐性強化の研究開発を行うことは、高放射線環境下や宇宙環境での使用を想定したデバイス開発における重要課題である

④ 特殊検査・測定

放射線や RI を利用した特殊検査や測定として、非破壊検査、放射化分析、RI トレーサー利用などが挙げられる。

放射線透過試験は非破壊検査に利用される代表的な試験技術であり、工業分野においては主に X 線発生装置、 γ 線照射装置が用いられている。 γ 線は検査精度(鮮鋭度)の面では X 線にやや劣るが、電源設備を必要とせず機動性に優れていることから、各種プラントや工場における品質管理に利用される。検査目的に応じた種々の線源核種と放射線使用施設外において安全かつ機能的に γ 線照射が可能な専用装置が開発されている[17]。最近では、中性子ビームによるラジオグラフィも実用の段階に入り、工業材料の残留応力解析[18]や自動車エンジン内部の可視化など産業界のニーズに応える利用法も開発されてきた。

放射化分析とは、試料に放射線を照射し、原子核反応により生成した放射性核種から放出される放射線を測定し、元素の分析・定量を行う方法である。検出感度が高く、少量の試料でも多元素同時分析が可能、などの優れた特徴を持っている。今日では、微量元素定量の代表的な方法の一つであり、自然科学、工学の分野だけではなく、考古学、医薬、環境などの分野でも有効な元素分析法として利用されている[19]。

トレーサー技術は、我が国では 1950 年ごろから研究に取り入れられると共に、物理学、化学、生物学、農学、林業学、水産学、畜産学、栄養学、環境科学などの基礎的、さらには材料工学などの応用研究に幅広く用いるようになってきている。放射性トレーサー法 (RI トレーサー法) は、トレーサーとして微量添加した放射性同位元素 (RI) の放射能を測定することによって、目的とする物質の移動や分布を追跡する方法である。RI トレーサー法の特徴は、追跡する放射性物質の検出感度が極めて大きいため、極微量のトレーサーで検出可能で、また対象物によっては非破壊でリアルタイム計測が可能という点にある。用いられる RI トレーサーは化学反応を追跡する場合には化学的トレーサー、物質の物理的な移動や分布を調べる場合には物理的トレーサーと呼ばれる[20]。

⑤ 年代測定

固有の半減期を持つ RI の特性は年代測定に有効な手段を提供し、考古学や地球惑星科学などの分野で広く利用されている。考古学的試料の年代測定法の代表である ^{14}C (炭素 14) 年代測定法は炭素を含む試料 (史料) について、数百年から 4 万年前くらいの範囲の年代測定を可能にする。従来の ^{14}C 年代測定法では、 ^{14}C の崩壊に伴って放出される β 線を低バックグラウンドの β 線計数管で測定するが、そもそも ^{14}C の存在比が小さい上、古い年代の試料では崩壊によってさらに量が減っており、信頼できる計数値を集めるには、試料の年代によって数時間から数日程度の測定を必要とする。

1980 年代に加速器質量分析 (AMS) による天然レベルのごく微量放射性同位体が測定できるようになって放射性同位体を用いる年代測定の応用の範囲が著しく拡大された[21]。採取された固形炭素試料の表面に Cs の陽イオンを照射して炭素の負イオンを生

成させタンデム加速器を用いて炭素を陽イオンへ荷電変換させる。それを電磁石により $^{12}\text{C}^{3+}$ 、 $^{13}\text{C}^{3+}$ 、 $^{14}\text{C}^{3+}$ に質量分離し炭素の同位体比 ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) を測定する。地球の自然生物圏における炭素の同位体組成比は $^{12}\text{C}:^{13}\text{C}:^{14}\text{C}=0.988:0.011:1.2\times 10^{-12}$ と既知であり、年代の経過と共に ^{14}C のみが減少するので、年代測定を超高感度に行うことができる。本測定法では測定試料が微量で済み、短時間の測定で ppt (parts per trillion=1兆分の1) レベル以下の同位体組成比が測定できる。

⑥ 基礎科学研究

基礎科学研究における放射線・RI の利用は多岐にわたるが、いくつか例を挙げるとすれば、タンパク質の構造解析、高温超伝導や磁性の発現機構の解明、植物機能の定量的な解析などがある。

タンパク質など複雑な構造をもつ生体分子の構造解析に放射光 X 線が威力を発揮している。高輝度放射光源の発達によって、極微量の試料での構造解析や、構造変化・化学反応のダイナミクスの追跡など、実験手法の高度化による新展開がある。中性子回折では、生体物質において重要な役割をはたす水素などの軽原子の観測が可能となる。放射光と中性子の相補的利用により創薬標的タンパク質の全原子構造解析から活性部位を特定し、創薬に不可欠な情報を得るといった研究が進展している。

放射光や中性子は物質の結晶構造のみならず、その内部における電子構造や素励起に関する情報をもたらす。パラジウム(Pd)、白金(Pt)、ロジウム(Rd)など貴金属の代替として廉価な銅酸化物が同等の触媒機能を有することを放射光の構造解析等から明らかにした研究や、高温超伝導体や磁性体における磁気励起や格子振動の観測を通じて高温超伝導やマルチフェロイック⁵特性の発現機構に関する重要な情報を得た研究などを挙げることができる。

以上列挙したように、放射線・RI の利用は広範な分野にわたっている。平成 19 年に内閣府委託事業により日本原子力研究開発機構が行った「放射線利用の経済規模に関する調査」報告書[22] に記されている試算によれば、平成 19 年の時点における「原子力のエネルギー利用」と「放射線利用」の比率は経済規模にして 54%対 46%とされており、原子力の利用として発電以外のものがかなりの規模であることが読み取れる。ただし、この試算における「放射線利用」は、小型の X 線発生装置、電子線照射装置、イオンビーム装置、あるいは RI からの放射線を利用して実施されるものまで含めてかなり広く捉えられていること、また原子力発電所の稼働率が特に福島原発事故以降大きく変化していることなどから、上記の数字は流動的であることに留意する必要がある。

⁵ マルチフェロイック物質とは、強磁性、強誘電性、強弾性などの性質を複数有する物質を指す。

(2) 中・大型研究施設の役割と現状

小型装置や RI からの放射線を用いる放射線利用は別として、高輝度の放射光 X 線や中性子・ミュオンなどの量子ビームを用いる実験等は、研究炉や加速器ベース量子ビーム施設などの中・大型研究施設において実施される。本節では、それらの中・大型研究施設について現状と課題を見ることとする。

① 研究用原子炉

我が国には日本原子力研究開発機構（JAEA）や京都大学原子炉実験所など研究機関が運営する研究炉が（廃止措置段階に入ったものを除いて）14 基あり、多様な分野の研究及び人材育成を支えている⁶。福島原発事故以降、原子力規制基準の見直しが行われるなか、研究炉も運転停止を余儀なくされている。福島原発事故を踏まえた原子力規制制度の見直しが行われ、新基準に基づく安全審査が進行中である。新基準では研究炉の出力規模や炉型の特徴を踏まえた安全対策という考え方が取り入れられている。研究原子炉のあり方に関して、日本学術会議は基礎医学委員会・総合工学委員会合同放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会からの提言「研究用原子炉のあり方について」を先ごろ発出した[23]。

研究炉は、核分裂反応で発生した中性子を各種の実験に供することを目的とする実験設備であるが、緊急停止が電力網に影響を及ぼす発電炉とは異なり、異常時に躊躇なく緊急停止することができるので不測の事態に対する耐性は相対的に高い。大型のものでも商用発電炉に比べると出力規模にして 100 分の 1 程度であり、沸点未満・非加圧の冷却というマイルドな条件で運転されるので、苛酷事故に至る可能性は低く、熱ストレスや放射線による構造材料劣化の問題も少ない。発電炉・研究炉を問わずあらゆる原子炉について安全対策に万全を期すことは勿論であるが、原子炉の規模や特性に応じて適正かつ現実的な規制基準が設定されることが望まれる。研究炉は医療・産業応用から基礎科学まで多様な分野の活動を支える研究インフラであり、その停止が長期にわたれば我が国の研究開発力に深刻な影響が及ぶ。

② 加速器ベース量子ビーム施設

我が国には、約 30 の研究機関に全部で 100 基あまりの中・大型の加速器がある⁷。その用途は、素粒子・原子核研究、核変換技術開発、量子ビームを用いた物質・生命科学研究、放射光応用、ビーム照射、医療応用、など様々である。

原子炉においては運転中の不測の事態に際して暴走を防いで確実に臨界未満の状

⁶ 日本学術会議提言「研究用原子炉のあり方について」（平成 25 年 10 月 16 日）（参考文献[2]）の図 1-10 による。元となるデータは原子力安全委員会資料「試験研究用原子炉施設の新規制基準の考え方」（平成 25 年 5 月 28 日）
http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/kaku_shinkisei/data/0006_03.pdf

⁷ 日本加速器学会が集計した「国内主要加速器関連施設一覧（2013 年 5 月 9 日現在）」による。
<http://www.pasi.jp/kanrenshisetu.html>

態に移行して停止し、さらに運転停止後も崩壊熱を除去する継続的冷却措置が必要である。それに対して、運転停止と共に停止状態となる加速器ベースの装置にはそのような要素がないことから、原理的安定性は保証されている。しかしながら、特に大強度のビーム施設においては、作業員の被ばくの可能性や、加速器及びその周辺の構造材料等の放射化の問題に適切に対処しなければならない。その意味で、平成 25 年 5 月に J-PARC ハドロン実験施設で起こった放射性物質漏洩事故は、慣れに伴う安全意識の低下や事故発生後の安全対応策の不備に警鐘を鳴らすものであった⁸。

(3) 原子力利用と安全性確保のための技術開発

① 研究用原子炉と加速器施設の役割分担と新たな方向性

前項に記したように、放射線・RI 利用において研究炉が果たしてきた役割は大きく、今後も放射線・RI 利用の実践の場であると共に、新たな利用法の研究開発や高度人材育成の場として、安全管理に万全を期した上で適正な運用がなされることが望まれる。研究炉からの定常中性子ビームの特徴は、定常的かつ強い時間平均中性子束と、各種実験測定の必要に応じた高い自由度を提供できるところにある。加速器ベースのパルス中性子ビームとの相補的な利用環境が安定して提供されることが我が国の基礎研究開発力の維持・増強に必要である。長期的には、加速器及び関連技術の進歩により、加速器ベースの施設によって実施可能な中性子ビーム利用の範囲の拡大が期待されることから、研究炉の用途はその特性である定常中性子ビームの特徴が真に活かせる分野に絞る方向で、適正な役割分担を検討していくことが重要である[24]。加速器ベースのパルス中性子ビームでは代替が困難である用途としては、①中性子小角散乱実験、②スピン偏極中性子を用いる実験、③放射化分析、などがある。また、定常中性子ビームの強い中性子束、利用の簡便性と低ランニング・コストなど原子炉の特徴を活かせる応用分野として、④イメージング、⑤材料照射、⑥BNCT、などがある。

加速器駆動未臨界炉 (ADSR: Accelerator Driven Subcritical Reactor) は、原子炉に臨界には達しない量の核燃料を置き、加速器からの中性子ビームによって核分裂反応を駆動する方式である。即発臨界による核暴走の危険がなく、本質的な安全性を備えた方式である。核変換技術の関連でも注目されており、将来の有力な方向性となり得る。

② 研究用原子炉の特性を踏まえた合理的な安全規制と安全管理

福島原発事故を踏まえて原子炉の安全性確保のための規制の見直しが行われた。新たな規制基準が制定され、発電炉に対して新規制基準に基づく適合審査が行われている。研究炉についても新規制基準への適合確認を行うこととなり、その審査の目途が立たないため、本提言とりまとめ時点（平成 26 年 8 月）では、発電炉のみならず国内

⁸ J-PARC におけるハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故に関する報告書は下記のサイトに掲載されている。
<http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>

のすべての研究炉も停止状態にある。研究炉の停止が長期間に及べば、我が国の原子力利用研究開発に深刻な遅れが生ずるばかりでなく、原子力関連分野の人材育成にも重大な支障を来し、将来の人材枯渇を招くことが強く懸念される。発電炉に比べて危険度が桁違いに小さな研究炉に対しても新規規制基準への適合確認がすべて完了するまで運転を認めないことが果たして合理的かどうか検討の余地がある。特に、強制冷却が不要な近畿大学原子炉 UTR-KINKI (出力 1W) や、京都大学原子炉臨界実験装置 KUCA (100W) のような低出力の研究炉に対しては、運転を継続しながら適合確認を進めることでも安全性に関して問題はないものと考えられる。

国際的な核セキュリティの観点から、核燃料やプルトニウムを含む使用済み核燃料の管理・保管に万全を期すべきことは言うまでもない。また、研究炉の燃料についても高濃縮ウランから低濃縮ウランへの転換を図ることが必須とされており、遠くない将来に対応が必要となる。これは使用済み燃料の処理の問題と共に、研究炉を運営する個々の研究機関で対処できるレベルをはるかに超えた課題であり、国として対処すべき事項である。

③ RI 製造と供給

我が国で利用されている RI はその多くを輸入に頼っているため、①短半減期核種の利用に制約がある、②研究・開発上新たな RI が必要なときに早急な対応が困難である、③海外製造所でのトラブルや輸送中のトラブルで利用に支障をきたす、④海外の製造所における製造の一方的な中止により研究・開発に支障をきたす、などの問題を抱えている。これは、RI の利用上大きな問題であると共に、医療分野では患者の診療に深刻な問題を引き起こす。安定した供給体制を構築することが重要かつ緊急な課題といえる。

RI を製造する原子炉は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の JRR-3 (Japan Research Reactor : 3号炉) 及び JRR-4 (4号炉) であるが、新たに照射設備を増設するなどの対応を行う計画はない。同機構が有する JMTR (Japan Materials Testing Reactor : 材料試験炉) では現在改修計画が進められている。平成7年の閣議決定により同機構の RI 製造には制限が付けられているが、海外から入手できない RI にまで制限が及ぶものではない。JMTR での RI 製造は、我が国における RI の安定供給にとって喫緊かつ最も重要であり、この改修計画で的確な対応がなされるべきである。

医療診断用の放射性医薬品の承認審査においては、医療診断に用いる RI が短半減期であり、かつ使用量が極微量であることを勘案して、一般の医薬品の承認基準とは別の基準に基づく合理的な安全審査が行われるべきである。そのことよって新規放射性医薬品の利用が促進され、医療の質の向上に資すること大である。また、PET 薬剤製造装置の承認審査についてもより合理的になされるべきである。

中性子反応による製造は原子炉でなされるが保守・点検等による中断は避けられない。加速器を用いた中性子源による RI の製造法が開発できれば原子炉での製造のバックアップになり、加えて荷電粒子反応による RI の利用にも道が開けることから、今後

の開発が望まれる。また、世界的に先端的な加速器である RI ビームファクトリーや J-PARC において本来のビーム利用研究と並行して RI の製造ができればこれまで利用できなかった RI が利用できることとなり、その利用価値はさらに大きくなる。各種 RI の安定供給のためには、これらの施設において産業界とも連携して製造・供給体制が整備されることが強く望まれる[25]。

④ 核廃棄物及び放射性廃棄物処理のための技術開発

平成 22 年 3 月末の時点で、我が国の原子力発電の利用により発生した使用済み核燃料は約 1 万 7 千トン存在する。これらすべてを現在の技術で再処理すると、現在の貯蔵量を含めてガラス固化体約 2 万 5 千本相当の高レベル放射性廃棄物が発生する。この高レベル放射性廃棄物の処分については数万年にわたり人間の生活環境からの隔離が求められるなど、環境との調和において高いハードルを克服していくことが必要である。こうしたハードルを克服するためには放射性廃棄物の処理・処分に関する研究開発を着実に推進し、技術的なオプションを増やすと共に、より環境に調和しやすい形での処理・処分の方法を見出していかなければならない。

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離する「分離技術」と共に、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換する「変換技術」を併用して次の 3 つの目標を達成することが望まれている。①廃棄物の潜在的有害度の総量を大幅に低減する試みであり、放射性廃棄物の長期にわたるリスクの低減につながる。②発熱量の大きい核種を除去してコンパクトに処分する試みであり、処分場の実効処分容量を増大させることにつながる。③白金などの希少元素を利用する試みであり、放射性廃棄物の一部を資源として有効利用できることにつながる。

原子力利用のバックエンドにとって有用な技術として、半減期が長く取扱いが困難な核種を、非放射性あるいは短寿命の核種に変換する短寿命化核変換がある[26]。使用済み核燃料廃棄物の中には、長寿命かつ放射毒性の強いマイナー・アクチノイドと呼ばれる一連の核種があり、これらを短寿命核種に変換することは核廃棄物処理において重要な技術である。核変換とは、半減期の長い核種を半減期の短い核種に変換することにより核廃棄物処理を容易にする技術である。核変換には中性子照射を用いるが、原子炉内の中性子を利用する方法と、加速器からの陽子ビームによる核破砕により発生する中性子を利用する方法がある。前者について、核燃料サイクルの一環として高速増殖炉「もんじゅ」をその目的に利用する計画もあったが、「もんじゅ」は度重なるトラブルにより運転の見込みが立っていない。処理専用的高速炉建設という選択肢も検討されている。後者については J-PARC において基礎研究が行われている。将来、核変換技術の導入を検討する際に、「発電用高速炉利用型」のサイクルと、加速器駆動核変換システムを用いた「階層型」サイクルとについて、技術的成熟度、費用対効果、社会受容性等の観点からの比較評価を行うことが想定されることから、その際の判断基準も考慮した研究開発を進めるべきである。

⑤ 高放射線環境における作業のためのロボット技術の開発と活用

原子力利用の現場において高放射線環境における作業を安全に行うことは極めて重要であり、そこではロボット技術の開発と活用が鍵となる。現時点では、福島原発の事故収拾作業が最重要の緊急課題であるが、将来にわたる原子炉廃炉作業や高強度量子ビーム施設における維持管理においても、ロボット技術の有効活用が望まれる。

福島原発の事故収拾作業を例にとると、高い放射線環境となっている災害現場における作業員の被ばくを極力減らすため、遠隔操作型ロボットが情報収集や建屋内外での作業に導入されている。建屋内と建屋外とでは作業内容に違いがあり、それに応じて以下に記すような遠隔操作機器が用いられている[27]。建屋外の作業では、建屋から約2 km離れた拠点に遠隔操作のコントロール車を置き、作業場所付近に中継車を配置して、耐放射線遮蔽を設置した電子装置により大型クローラクレーン、解体重機等の建設機械の遠隔操作を行っている。建屋内の作業としては、廃炉内のコンクリート層やダクト等の瓦礫の撤去があり、小型双腕重機型ロボットや、多自由度を持つ調査用アームロボットと高所作業台車の組み合わせで高所狭隘部高線量箇所の調査が可能なロボットも開発されている。これらの遠隔操作型ロボットは耐放射線性を備えているが、使用済み核燃料や福島原発の地下1階の燃料デブリの空間線量率は10.4 Sv/hにも及び、耐放射線性を有する機器にも劣化が生ずる。その対策として、耐放射線用カメラにはビジコン撮像管（真空管）を用い、光学機器には超高純度石英素材、光ファイバーには耐放射線性ファイバーを用い、また、耐放射線性が実現できない電子機器は遮蔽を施した上で放射能線源から遠くに離して設置するなどの工夫が行われている。しかしながら現状では、これらを組み合わせても高い空間線量率の、使用済み燃料や燃料デブリの周辺で活動できる「原子力用遠隔操作型ロボット」は存在しない。これら各構成要素の高放射線耐性を確保して、システムとして原子力用遠隔操作型ロボット技術を確立することは、福島原発の瓦礫の撤去作業のみならず、将来の原子炉の廃炉作業にとっても極めて重要な課題である。

(4) 原子力分野の教育と人材育成

① 福島原発事故の影響及び関連の提言等

福島原発事故は我が国の原子力エネルギーをめぐる状況を一変させ、原子力に対する国民の信頼を大きく損なうという結果を招いた。事故を踏まえ、産官学連携で構成する原子力人材育成ネットワークは平成23年8月に「東京電力福島原子力発電所事故を踏まえた原子力人材育成の方向性について」と題するメッセージを発信し、原子力人材育成に関する課題を整理すると共に、重点的に取り組むべき人材育成活動の方向性を述べている[28]。平成24年11月27日、原子力委員会は、「原子力人材の確保・育成に関する取り組みの推進について」という見解を公表している[29]。平成26年2月、原子力関係閣僚会議において我が国のエネルギー基本計画に対する意見が取りまとめられた。その中で原子力は、安全性の確保を大前提にエネルギーの需要構造の安

定性に寄与する重要なベースロード電源と位置付けられ、原子力とその技術・人材の維持の方針が打ち出されている[30]。また、原子力人材育成ネットワークでは、原子力人材育成の今後の進め方についての提言を取りまとめている[31]。

大学における原子力関係学科・専攻への学生の志望状況については福島原発事故以降、原子力離れが進み志願者数の大幅な減少が起こった。最近では下げ止まりの傾向が見られるが、志望動向の変化を引続き注視する必要がある。福島原発事故後、全国の原子力発電所の長期停止という状況を踏まえて、原子力関連の企業では新卒採用の抑制、原子力部門からの配置転換や離職が増加しているのが現状である。このような状況を考えると、早急に原子力事業の将来予測を行い、原子力に関する人材の需要の見通しを明確にすることが必要である。そのためには我が国のエネルギー政策における原子力発電の位置付けを明確にする必要がある。また、より一層の原子力の安全性向上や福島原発の廃止措置、デブリの回収、処理のための研究開発など、原子力人材の新たなニーズを示すことも重要である。国のエネルギー政策の基本方針に基づき、原子力の人材育成、技術基盤の維持・継承を効果的、効率的、計画的、戦略的に進め、今後の人材の需要動向の見通しを行うために、人材育成ロードマップの作成が望まれる。

福島原発事故の教訓を踏まえた原子力教育プログラムとしては、基本的な原子力教育に加えて、原子力安全、防災、危機管理、除染、放射線影響などについての知識と意識を大学教育の段階から高めておく必要がある。また、福島原発事故の教訓からシステム全体の安全を俯瞰し総合的に判断できる能力や想像力などを身に付けさせることも望まれる。そのためには、原子力の専門家として必要な知識、技量を身に付けていることが保証できるようにするため、原子力の基礎・基盤として必要な標準カリキュラムを示すことが重要になる。また、初等中等教育課程においても原子力や放射線に関わる知識を学ぶ機会を適切に設けることが、原子力利用に関する国民の理解の観点から重要である。

② 原子力分野の教育基盤の現状と問題点

大学等における最近の常勤ポストの削減により、原子力関連の諸分野の教育を担当できる教員を確保することが極めて難しくなっている。特に、炉物理、放射化学など、地道な研究の積み重ねが必要で、世間一般から注目を浴びるような研究成果とは縁遠い傾向のある基礎基盤分野では教員ポストが削減の対象となりやすいことから、教員の不足が著しい。このような厳しい状況において、原子力分野の一貫した教育を実施するためには、教育のネットワーク化や大学同士の連携が重要である。そのためには、大学間連携に基づくカリキュラムやテキストの共通化、遠隔TV講義システムを利用した遠隔方式の講義などが必要であろう。

大学が保有する教育・研究用の原子炉や臨界実験装置は、現在、京都大学と近畿大

学にあるのみである⁹。京都大学原子炉実験所の研究炉では国内の大学・大学院向けに学生実験を行うと共に、海外からの学生も受け入れている。近畿大学では専門家や学生以外にも原子炉に触れて実感する機会を提供し、原子力の理解促進に役立てられている。このような研究炉や臨界実験装置を用いた実験教育は実施できる機関が限られており幅広いニーズに応えられる状況にはない。特にスタッフにかかる負担が大きなものとなっている。このような状況を改善するには施設を有する機関のスタッフのみならず、外部スタッフも積極的に参画できるように教育の体制を見直す必要がある。

長期的な原子力人材育成をどのようにすべきかは、我が国の原子力政策がどうなるかに依存することとなるが、仮に原子力発電からのフェーズアウト（段階的廃止）を選択する場合でも、今後数十年にわたり廃炉等に携わる技術者が必要となる。また、海外では原子力導入が進められており、そのために日本の原子力技術を活用することが期待されている。このためには、継続的な人材育成が必要となるが、そのための基盤となる実験設備（特に、研究炉）やスタッフの維持が現状のままでは困難である。特に、安全規制への対応を中心とした施設管理を、今後も長期にわたり大学で実施していくことは難しいと考えられる。このために、国あるいは原子力機構のような専門機関が主体となった研究炉の管理組織を設置し、そこに専門のスタッフを置き、研究炉の運転管理を行う形態とすることが望ましい。ただし、運営の主体は大学（連合）とし、運転計画や予算配分については、管理組織の意見を踏まえて決定すべきである。

放射線科学の教育・研究においては、J-PARCなどの大型加速器施設における共同利用実験や九州大学の加速器・ビーム応用科学センターなどの大規模加速器などが利用されており、従来の放射線利用だけではなく量子ビームテクノロジーなど新たな技術領域における教育効果が期待されている。

また、大学等における非密封放射性同位元素（非密封 RI）取扱い施設については、厳重な安全管理が必要なことや代替物質として蛍光物質の利用が進んでおり非密封 RI を使ったトレーサー実験が減少している。しかし、一方では分子イメージング研究における非密封 RI 利用を展開する大学などもありニーズは変化するものの、教育の場における非密封 RI 利用の経験は放射線の安全管理の基礎を学ぶ上で重要である。

③ 原子力分野における持続的人材育成の必要性

エネルギー源としての原子力利用の将来選択の如何に関わらず将来にわたって原子力分野に適正規模の人材が必要である。仮に我が国が原子力発電からのフェーズアウトを選択するとしても、現存の原子炉の廃炉作業や核燃料管理という長期の課題への取組や、広範な放射線・RI 利用の分野に人材が必要である。前者に関しては文部科学省では、「東京電力（株）福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」を策定し、それを踏まえて廃炉に関連した「廃止措置等基礎基盤

⁹ 大学が管理・運営していた他の研究教育用原子炉は以下のようにいずれも運転を停止し、廃止措置に入っている。立教大学（2003 年廃止届、2007 年認可）、東京都市大学（旧・武蔵工業大学）（2004 年廃止届、2007 年認可）、東京大学（2011 年廃止届、2012 年認可）。

研究・人材育成プログラム」を開始する。廃炉のみならず原子力利用の重要分野の人材育成が適切に行われるよう、その育成現場たるべき研究炉の運用のあり方について関係機関の取組が望まれる。

人材育成の前提として、適正な数の意欲ある若者が当該分野を志すことが必要である。そのためにはその分野の将来が魅力的であって、習得したスキルを活かした活躍の場が描けることが必要である。原子力利用に関する将来展望を国民的議論により描くことは現世代の責任である。

平成 24 年 11 月 27 日に原子力委員会が発表した「原子力の人材確保・育成に関する取り組みの推進について」[29]は、技術者の人材の確保に言及している。それによれば、中長期的には、発電炉、研究炉を問わず、この関連業務の将来性への不安により、従事することを希望する新規の人材を確保することが困難になる可能性がある。そこで、原子力産業界は中長期にわたる業務計画を策定し、その計画達成に必要な量と質の人材を確保するための取組のあり方を検討し、実施していくべきである。具体的には、保全技量認定制度と原子力施設立地地域等が独自に設けている原子力施設の保守・補修に関する技量認定制度の連携を図り、全国的規模に拡大すべきである。これら制度における技能訓練の内容は現在の設備の操作並びに、放射線環境における技術及び廃棄物管理技術の習得のみならず、仕事の改善推進能力、各種法令遵守、部下の指導、職場の設計・運営能力などを段階的に習得できるようにすべきである。

放射線の医療応用は今後ますます発展するものと期待されるが、欧米に比べ日本では医療現場で活躍する医学物理士が決定的に不足している。平成 18 年から始まった文部科学省の「がんプロフェッショナル養成プラン」で放射線治療の人材育成が図られてきており、現在、国内の医学物理士育成は 16 大学機関の大学院（修士・博士課程）で行われている。しかし、医学物理士に対する認識は十分ではなく、この分野を志望する学生は決して多くなく、今後ますます高まってくると予想される需要に応える努力をしなければならない[32]。

④ 原子力分野の人材育成における国際貢献

原子力分野の教育機能はアジア地域をはじめとする諸国への国際貢献としても重要である。かつて我が国がそうであったように、発展途上国が発電炉を輸入して稼働させる動きが広がる可能性がある。それらの国が将来、独自に原子炉を建設する可能性もある。その際、原子力利用の経験や技術が十分でない国において事故が発生することも懸念される。原子力を新規に導入しようとしている国からの我が国の原子力技術に対する期待は高い。福島原発事故の教訓を世界と共有することにより、世界の原子力安全に貢献していくことは我が国の責務であり、相手国の事情や意向を踏まえつつ、世界最高水準の安全性を有する技術を提供していくことが重要である。この観点からも原子力技術や人材を適切な水準で維持する必要がある。

原子力利用に関する国際的ルールづくりに、福島原発事故を経験した我が国は IAEA 等の国際機関と連携して積極的な役割を果たすべきである。国際原子力機関 IAEA 総会

資料によれば、IAEA への我が国の拠出額は7%で米国に次いで2番目に多い一方、IAEAに雇用されている日本人の正規職員数は全正規職員数の約3%に過ぎない。人的貢献の面で、我が国の国際活動は未だ十分とは言えず、今後の積極的な活動が望まれる。

原子力分野の国際人材育成の場としては、日本原子力研究開発機構が平成24年度から開催している「原子力国際人材養成コース」、若狭湾エネルギー研究センターが平成23年度から開催している「国際原子力人材養成コース」、IAEAと東大、日本原子力研究開発機構、日本原子力産業協会、原子力国際協力センター(JICC)及び人材育成ネットワーク(文科省・経産省プロジェクト)が連携協力して平成24年度から開催している「IAEA 原子力エネルギー・マネジメントスクール」や「世界原子力大学(WNU)」などがある。

IAEA や FNCA (アジア原子力協力フォーラム) 等との連携を図り国際的な人材育成ネットワーク化を進めることは、原子力人材育成活動を活性化させるためにも重要である。人材育成について IAEA 傘下のアジア原子力技術教育ネットワーク(ANENT)、アジア原子力安全ネットワーク(ANSN)、アジア地域核データネットワーク等を通じた活動に積極的に取り組むことが望まれる。

(5) 発電以外の原子力利用のあり方に関する社会との対話

① リスクコミュニケーションと社会的選択のあり方

福島原発事故は原子力利用に関する市民の不安と不信を募らせることとなった。原子力に留まらず、科学・技術全般や科学者・技術者に対する市民の信頼感も著しく低下したことが文部科学省科学技術政策研究所による「月次意識調査」等から浮かび上がっている。本提言において論じている「発電以外の原子力利用」についても、単にその有用性を謳うだけでは、市民と研究者の対話がすれ違いに終わる可能性がある。科学者・技術者からの透明性の高い情報発信と原子力・放射線・RIに関する科学的知識の普及により、対話による理解と合意形成の基盤を築く努力が必要である。

原子力に限らず、科学・技術の利用には、ベネフィット(効用)と共にリスクが伴うことが少なくない。リスクを伴う科学技術の社会実装に関して、関係主体(ステークホルダー)間の十分なリスクコミュニケーションに基づく対話を通じた社会的選択がなされなければならない。文部科学省の「リスクコミュニケーションの推進方策」[33]では、リスクコミュニケーション(risk communication)は「リスクの、より適切なマネジメントのために、社会の各層が対話・協考・協働を通じて、多様な情報及び見方の共有を図る活動」と定義されている¹⁰。その際に、科学的知見に関して専門家と市民との間には概して知識・情報の非対称性が存在すること、専門家がその専門

¹⁰ リスクコミュニケーションの定義として、「社会を取り巻くリスクに関して、専門家、市民、行政、企業などの関係主体(ステークホルダー)間で正確な情報を共有し、相互に意思疎通を図る活動」という表現もある。

分野コミュニティ独特のものの考え方に囚われている可能性もあること、リスク認識には個人差があること、などを互いによく理解しなければならない。原子力利用のような一定のリスク負担を伴う活動に関する合意形成には、科学的知見のみではない信頼関係や、計画の初段階からの対話と協働が重要である。関係主体間の真摯な対話の積み重ねの上で、民主主義の原則に則った社会的選択の決定がなされなければならない。

② 放射線の生体影響に関する科学的知見とリスク認識

福島原発事故では、水素爆発などによって多量の放射性物質が大気中に放出され、それらがその後の気象状況（風向きや降雨）によって拡散することにより、程度の差はあれ広域にわたる環境放射能汚染をもたらした。環境放射能汚染の程度とその人体や生態系への影響の評価、除染の必要性和実効性、などをめぐって地域住民間あるいは行政との間に様々な葛藤があることが報じられている。

市民にとって放射線被ばくは、もっぱら医療（診断、治療）関連で体験するものであり、その場合には患者やその家族がそのベネフィットとリスクとを勘案した上で利用の選択をしているが、福島原発事故のように、地域住民にとってはベネフィットがないままに、不要であったはずの被ばくを受けたことに対して不条理を感じるのは当然である。

放射線の人体影響に関するリスク認識や不安は、市民の間のみならず科学者の間でもかなりの幅がある。さらに市民の間でも、当然のことながら居住地や家族構成によって不安の度合いは異なる。福島及び他の地域における市民の放射能影響に関する意識調査の分析研究[34]によれば、特に福島においては子供を持つ家庭において顕著に不安が強いこと、市民が抱く不安の要因として「低線量被ばくの生体影響に関する科学的知見の不確定さ」や「政府等関係者の言動に対する不信感」があること、などが明らかになっている。

広島・長崎の被ばく者の追跡調査や原子力施設における被ばく事故の調査のデータ等から、概ね 100mSv 以上の高線量被ばくによる健康への確定的影響については、確度の高い科学的知見が得られている。それに対して 100mSv 以下の低線量被ばくによる確率的影響については、他の健康リスク要因との分離が難しく未だ科学的知見が不十分である。国際放射線防護委員会(ICRP)が定めている放射線規制の国際基準は、短時間の被ばくと長時間にわたる被ばくの影響の違いを考慮した¹¹上で、高線量領域のデータを低線量領域に直線的に内挿したものを採用している。この基準によれば、低線量被ばくにおいても（被ばくの影響に閾値はなく）被ばく量に比例した影響があることになる。低線量被ばくの確率的影響に関わる国際規制基準が、このように、不確定性

¹¹ 高線量被ばくデータは広島・長崎のように短時間の大量被ばくであり、長時間にわたる被ばくにおいては、生体の修復作用のあることから被ばくの影響は相対的に小さくなると考えられるので、ICRPの基準では長時間にわたる高線量被ばくの場合は、短時間大量被ばくの影響の1/2としている。

の幅を考慮して最も安全側の基準を採用するという考え方に基づいて定められたものであるということは、対話のベースラインとしてより広く周知される必要がある。その上で、市民の個々人が納得して生活をするために、居住地域や年齢、家族構成などに沿ったきめ細かな情報提供が必要である。

③ 原子力関連研究施設の建設・運用に関する社会との対話と合意形成

原子力利用というと一般には原子力発電のイメージが強いが、本稿で述べたように現代社会における原子力利用は医療も含めた広範な分野における放射線・RI 利用という多面性を持っている。そのことが広く国民に理解されるよう、情報にもとづいた意思決定可能な選択肢の提供が必要である。発電以外の原子力利用に関する認識が浸透し放射線・RI 利用の重要性が理解されているとしても、そのことと、現実に原子力関連研究施設の建設・運用を地域住民が支持するかどうか、は別次元の問題である。「総論としては必要性が認められるものの地域的受容性が必ずしも高くない施設」の設置・運用に関して、事業者や行政と市民との対話に基づく合意形成のあり方は、原子力関連施設に限らず様々な科学技術の社会実装に共通する重要な課題である。

原子力学研究開発の基盤施設である研究炉や加速器ベース量子ビーム施設の現状は3-(2)に記したが、それらの研究施設においては地域コミュニティとの信頼関係を築くべく関係者の努力が続けられた結果、施設の運用に対して一定の理解と支持が得られているものと評価できる。しかしながら、先述の J-PARC における放射性物質漏洩事故の際に地域コミュニティへの通報や情報提供が迅速に行われなかった点など、地域とのコミュニケーションのあり方について反省すべき事例は原子力関係者で真摯に共有すべきである。研究開発を遂行する研究者・技術者及び原子力関連研究施設の管理運営責任者は、引続き安全管理に十全の注意を払うと共に、適切な情報共有と双方向の意見交換・対話を通じて地域コミュニティとの信頼関係を維持・強化しなければならない。安全管理に関して行政と連携して適切な情報発信を行うこと、施設の一般公開や地域活動・地域経済との交流・連携等を通じて地域に対して開かれた施設とすること、が重要である。施設の運営に責任ある立場の研究者・職員が当該地域に居住し、地域住民としての立場を共有することは対話を円滑にする上で一定の効果がある。

放射線の生体影響、原子力施設のリスク評価とレジリエンス、原子力利用の意義と効用、といった事柄について可能な限り共通の理解に達するようステークホルダー(科学者・行政・市民)間の対話を進め、社会的選択に関する合意形成に至る協同作業が必要である。そのような対話に基づく合意形成は、原子力に関する事項のみならず、成熟した社会における科学・技術の社会実装の決定のあり方の範例となるべきものである。

4 提言

放射線やRIの利用など発電以外の原子力利用は、同じ目的を放射線やRIを用いずに達成することが原理的に不可能なものがほとんどである。従って、将来にわたる放射線やRI利用促進について、総論として国民の支持は得られるものと考えられる。課題は、使い方によっては生体や環境に影響を及ぼす、放射線やRIをいかに安全かつ有効に使うか、という点にある。特に、原子力利用研究の基盤施設となる研究炉や大型加速器施設の建設・運営は、近隣住民との対話による共通理解の基盤のもとになされなければならない。原子力分野の科学者は、福島原発事故によって原子力利用に関する国民の信頼が大きく損なわれたことをしっかりと認識し、新たな信頼構築に向けて不断の努力をする必要がある。自らのバイアスも意識しつつ社会との対話を心掛け、より適切な原子力利用のあり方に向けて努力すべきである。

本提言では、発電以外の原子力利用の将来のあり方に関して、以下の6項目を提言する。

(1) 原子力利用の多面性の周知と放射線・RIに関する科学的知識の普及

原子力が発電以外の多様な分野で広く利用されているという事実がより広く国民に認識されるよう、原子力関連分野の科学者はこれまでも増して情報発信に努めるべきである。物理学の基礎研究から医療・診断、品種改良、食品処理、材料開発、などの応用にいたる広範な分野における放射線・RIの役割とその社会的意義の認識の普及と、環境における放射性物質のふるまいや放射線の生体影響に関する科学的知識の普及は、原子力利用に関する対話による理解と合意形成の基礎となるべきものである。

(2) 放射線・RI利用研究開発の推進

物理学の基礎研究に必要な不可欠なツールとして開発されてきた高エネルギー量子ビームは、物質材料科学や生命科学においてもその有用性を証明し、さらには医療などの応用分野への展開を見せている。諸分野における放射線・RI利用による新たな科学的知見の獲得や新技術の実現に向けた研究開発は今後とも強力に推進されるべきである。並行して、原子力利用の安全性を高める研究開発や、自然環境における放射性物質のふるまい及び放射線被ばくの中長期的影響の調査研究を進めることにより、原子力利用におけるリスクを低減する不断の努力も求められる。原子力関連分野の先端的研究や安全研究の推進に際しては、適切な情報交換のもとに国際連携で取り組むことが肝要である。

(3) 将来の原子力利用の諸相を俯瞰した人材育成

今後ますます広範な分野へと展開することが予想される放射線・RI・量子ビーム利用を開拓・推進する人材を多様な分野から育成していく必要がある。そのために、我が国における原子力利用の諸相（発電、及び、放射線・RI・量子ビーム利用）の将来展望に基づく計画的な人材育成が求められる。原子力関連分野の科学者は次世代を担う若者に

多様な分野における原子力利用の役割と魅力を伝え、国はそれらの道を志す若者たちに将来の活躍の場に関する展望を示すべきである。原子炉に直接関わる人材・人員の将来的な総需要は原子力発電に関わる社会的選択に依存するが、仮に原子力発電からのフェーズアウトを選択する場合においても廃炉及び核廃棄物・放射性廃棄物処理を含む重要な課題に数十年スケールで取り組む人材が必要である。原子力のバックエンド問題を社会から見える形で位置付け、やり甲斐のある重要な仕事としてそれらに積極的に取り組む人材を計画的に育成していくことが求められる。また、我が国が原子力関連分野の人材育成に関して行ってきた国際貢献も強化すべきである。

(4) 研究用原子炉と加速器ベース中性子ビーム施設の役割分担

我が国における中性子利用は、長期的方向性としては、その主体を研究炉から加速器ベース量子ビーム施設に移して行くことが望ましい。しかしながら、定常ビームであることを必須とする実験や照射応用など、原子炉からの中性子の特徴が活きる分野もあることや、研究炉には原子力関連人材育成の場としての機能もあることから、適正規模の研究炉施設を維持・運営することが望まれる。既存の研究炉の高経年化の現状を踏まえ、国及び研究者は研究炉の将来のあり方の検討を急ぐべきである。その際に、より安全性の高い方式の原子炉への転換の検討もなされるべきである。

(5) 発電用原子炉と研究用原子炉の特性の違いを踏まえた合理的な安全規制と安全管理

福島原発事故の経験を踏まえて原子力規制・安全基準の見直しが行われた。発電用・研究用を問わず原子炉の安全性に関して十全の対策を施すべきであるのは当然として、研究炉と発電炉とでは出力規模やシステム設計が異なること等、リスクや特性の違いを踏まえた合理的な安全規制がなされることが望まれる。原子力事業者においては安全性の確保に向けて、モニタリングや制御技術の向上に努めると共に、人間工学的な側面の安全研究も進めるべきである。

(6) 原子力関連研究施設の建設及び管理運営に関する対話と合意形成

医療応用等も含めた原子力利用の研究施設の必要性に関して総論的な支持は得られるものと考えられるが、実際に原子力関連の研究施設が設置される地域コミュニティの支持はまた異なる次元の問題である。研究開発を遂行する研究者・技術者、原子力関連研究施設の管理運営責任者、及び規制に当たる国や自治体は、原子力研究施設の安全管理に十全の注意を払うと共に、適切な情報開示と対話を通じて市民との信頼関係を築き、それを維持しなければならない。施設の一般公開や地域活動・地域経済との交流・連携等を通じて、地域コミュニティに開かれた施設とすることが肝要である。

<参考文献>

- [1] 声明「原子力の研究と利用に関し公開、民主、自主の原則を要求する声明」日本学術会議（昭和 29 年（1954 年）4 月 23 日）
- [2] 回答「高レベル放射性廃棄物の処分について」（平成 24 年 9 月 11 日）日本学術会議
- [3] 提言「放射線作業者の被ばくの一元管理について」（平成 22 年 7 月 1 日）日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会
- [4] 第二次緊急提言「福島第一原子力発電所事故後の放射線量調査の必要性について」（平成 23 年 4 月 4 日）日本学術会議東日本大震災対策委員会
- [5] 第五次緊急提言「福島第一原子力発電所事故対策等へのロボット技術の活用について」（平成 23 年 4 月 13 日）日本学術会議東日本大震災対策委員会
- [6] 第七次緊急提言「広範囲にわたる放射性物質の挙動の科学的調査と解明について」（平成 23 年 8 月 3 日）日本学術会議東日本大震災対策委員会
- [7] 報告「エネルギー政策の選択肢に係る調査報告書」（平成 23 年 9 月 22 日）日本学術会議東日本大震災対策委員会 エネルギー政策の選択肢分科会
- [8] 提言「東日本大震災とその後の原発事故の影響から子どもを守るために」（平成 23 年 9 月 27 日）日本学術会議 東日本大震災対策委員会、臨床医学委員会出生・発達分科会
- [9] 提言「放射能対策の新たな一步を踏み出すために 一事実の科学的探索に基づく行動を」（平成 24 年 4 月 9 日）日本学術会議 東日本大震災復興支援委員会 放射能対策分科会
- [10] 提言「災害廃棄物の広域処理のあり方について」（平成 24 年 4 月 9 日）日本学術会議 東日本大震災復興支援委員会
- [11] 提言「原発災害からの回復と復興のために必要な課題と取り組み態勢についての提言」（平成 25 年 6 月 27 日）日本学術会議 社会学委員会 東日本大震災の被害構造と日本社会の再建の道を探る分科会
- [12] 報告「人類社会に調和した原子力学の再構築」日本学術会議 原子力工学研究連絡委員会 エネルギー・資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会（平成 15 年 3 月 17 日）
- [13] 硼素中性子捕獲療法（BNCT）の原理については、例えば下記の HP を参照のこと
http://www.antm.or.jp/06_bnct/01.html、
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/BNCT/bnct.html>
- [14] カドミウムがイネの根に吸収されコメに集積するまでの動態解析については、例えば下記の HP を参照のこと
http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/movie/cd_in_rice.html
- [15] 伊藤辰夫、戸田真人：シリコンの中性子照射ドーピング、放射線と産業、No. 64（1994），p. 19.
- [16] S. A. H. Mihammed and J. Walker: “Application of Electron Beam Radiation Technology in Tire Manufacturing”, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 59

(1986), p. 482.

- [17] 刈谷稔男：RI・放射線の産業利用、Radioisotopes, Vol. 46 (1997), p. 378.
- [18] 鈴木環輝、杉山昌章、及川初彦、野瀬哲郎、今福宗行、友田陽、鈴木裕士、盛合敦：中性子回折法による鋼材溶接部の残留応力評価解析、390号 (2010), p. 49.
- [19] 海老原充：中性子放射化分析—最も信頼できる元素分析法、放射線と産業、No. 129 (2011), p. 9.
- [20] 「放射線応用技術ハンドブック」朝倉書店 (1990).
- [21] 中村俊夫、中井信之：放射性炭素年代測定法の基礎—加速器質量分析法に重点をおいて、地質学論集、29 (1988), p. 83.
- [22] 平成 19 年度 「放射線利用の経済規模に関する調査報告書」(内閣府委託事業) (平成 19 年 12 月) 独立行政法人日本原子力研究開発機構
- [23] 提言「研究用原子炉のあり方について」(平成 25 年 10 月 16 日) 日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会
- [24] 「次世代研究用原子炉検討特別委員会報告書 — 次世代研究用原子炉の建設に向けて —」(平成 24 年 12 月) 日本中性子科学会次世代研究用原子炉検討特別委員会
- [25] 提言「我が国における放射性同位元素の安定供給体制について」(平成 20 年 7 月 24 日) 日本学術会議 基礎医学委員会総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会
- [26] 「群分離・核変換技術評価について (中間的な論点のとりまとめ)」(平成 25 年 11 月) 文部科学省 科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、原子力科学技術委員会、群分離・核変換技術評価作業部会
- [27] 文部科学省、国際廃炉研究開発機構共催東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発計画と基盤研究に関するワークショップ (平成 25 年 11 月 26 日) 吉野伸：「福島第一原子力発電所における遠隔操作・ロボットの課題」講演資料
- [28] 「東京電力福島原子力発電所事故を踏まえた原子力人材育成の方向性について」
<http://jn-hrd-n.jaea.go.jp/houkousei.php>
- [29] 見解「原子力人材の確保・育成に関する取り組みの推進について」(平成 24 年 11 月 27 日) 原子力委員会
- [30] 「エネルギー基本計画」(平成 26 年 4 月 11 日) 原子力関係閣僚会議
- [31] 提言「原子力人材育成の今後の進め方について」(平成 26 年 9 月公表予定)。原子力人材育成ネットワーク
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2014/siryo26/siryo2.pdf>
- [32] 「放射線管理面からみたわが国の医学物理士の課題」山田省吾 学術の動向 平成 25 年 12 月号 p. 77。 http://www.jbmp.org/wp-content/uploads/jbmp_yamada.pdf
- [33] 文部科学省 安全・安心科学技術および社会連携委員会「リスクコミュニケーションの推進方策」(平成 26 年 3 月 27 日)
- [34] “Public anxiety, trust, and the role of mediators in communicating risk of exposure to low dose radiation after the Fukushima Daiichi Nuclear Plant explosion”, Saho Tateno and Hiromi M. Yokoyama, J. Science Commun. JCOM 12(02) (2013)

<参考資料 1 >

原子力利用の将来像についての検討委員会 原子力学の将来検討分科会 審議経過

平成 24 年

- 12 月 19 日 原子力利用の将来像についての検討委員会（第 1 回）
- 委員長の選出、副委員長・幹事の指名
 - 分科会の設置について

平成 25 年

2 月 12 日 原子力学の将来検討分科会（第 1 回）

- 委員長の選出
- 分科会の進め方について意見交換。

5 月 15 日 原子力学の将来検討分科会（第 2 回）

- 副委員長、幹事の指名
- 審議すべき内容について意見交換

10 月 29 日 原子力学の将来検討分科会（第 3 回）

- 中島健 京都大学原子炉実験所教授から「研究炉における教育・人材育成活動」について講演
- 小野公二 京都大学原子炉実験所教授から「ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)」について講演
- 質疑応答と意見交換

11 月 6 日 原子力学の将来検討分科会（第 4 回）

- 中西友子委員から「放射線利用」について講演
- 柴田徳思委員から「提言『研究用原子炉のあり方』」について講演
- 質疑応答と意見交換

12 月 3 日 原子力学の将来検討分科会（第 5 回）

- 北村正晴 東北大学名誉教授から「原子力とコミュニケーション」について講演
- 質疑応答と意見交換

12 月 10 日 原子力利用の将来像についての検討委員会（第 2 回）

- 各分科会の審議経過中間報告

平成 26 年

- 4 月 16 日 原子力学の将来検討分科会（第 6 回）
○中西委員の辞任（内閣府原子力委員会委員就任のため）について
○提言案のとりまとめについて
- 5 月 12 日 原子力学の将来検討分科会（第 7 回）
○米倉義晴 独立行政法人放射線医学総合研究所理事長から「放射線の医療応用」について講演、質疑応答
○提言案のとりまとめについて
- 6 月 3 日 原子力学の将来検討分科会（第 8 回）
○提言案のとりまとめについて
- 7 月 10 日 原子力学の将来検討分科会（第 9 回）
○提言案のとりまとめについて
- 7 月 11 日 原子力利用の将来像についての検討委員会（第 3 回）
○各分科会の審議状況について
- 9 月 19 日 日本学術会議幹事会（第 201 回）
○原子力利用の将来像についての検討委員会 原子力学の将来検討分科会 提言「発電以外の原子力利用の将来のあり方について」について承認