

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

報 告

人類社会に調和した原子力学の再構築

平成15年3月17日

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

この報告は、第18期日本学術会議 原子力工学研究連絡委員会およびエネルギー・資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会の審議結果を取りまとめて発表するものである。

#### 原子力工学研究連絡委員会

委員長 木村 逸郎 (第5部会員、原子力安全システム研究所技術システム研究所長、京都大学名誉教授)

幹事 今西 信嗣 (京都大学大学院工学研究科 教授)

幹事 田中 知 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

#### エネルギー・資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会

委員長 木村 逸郎 (第5部会員、原子力安全システム研究所技術システム研究所長、京都大学名誉教授)

幹事 木下 智見 (九州大学大学院工学研究院 教授)

幹事 藤井 靖彦 (東京工業大学原子炉工学研究所長)

委員 大澤 孝明 (近畿大学理工学部 教授)

委員 澤村 晃子 (北海道大学大学院工学研究科 教授)

委員 早田 邦久 (日本原子力研究所 理事)

委員 竹田 敏一 (大阪大学大学院工学研究科 教授)

委員 成合 英樹 (筑波大学名誉教授)

委員 大和 愛司 (核燃料サイクル開発機構 理事)

オブザーバー 柴田 徳思 (第4部会員、高エネルギー加速器開発機構 放射線科学センター長)

オブザーバー 北村 正晴 (東北大学大学院工学研究科 教授)

オブザーバー 松井 秀樹 (東北大学金属材料研究所 教授)

オブザーバー 班目 春樹 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

オブザーバー 久木田 豊 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)

オブザーバー 代谷 誠治 (京都大学原子炉実験所 教授)

以下の方々は、資料提供・審議参加などで協力を得た (順不同)

田中 靖政 (学習院大学名誉教授)

宮澤 龍雄 (元京都大学大学院エネルギー科学研究科 客員教授、  
環境ソシオシステム コンサルタント)

糸魚川直祐 (武庫川女子大学 文学部長、原子力安全システム研究所社会システム研究所長、大阪大学名誉教授)

前川 克廣 (茨城大学工学部 教授)

服部 修次 (福井大学工学部 教授)

工藤 和彦 (九州大学大学院工学研究院 教授)

鷺見 禎彦 (日本原子力発電(株) 取締役社長)

巻口 守男 (日本原燃(株) 経営企画室 企画部長)

佐々木宜彦 (経済産業省原子力安全・保安院長)

烏井 弘之 (東京工業大学原子炉工学研究所 教授)

森 一久 (日本原子力産業会議 副会長)

河原 暉 (株)日立製作所 常務 技師長)

岩崎 信 (東北大学大学院教育情報学研究部・教育部 助教授)

## 1. 報告書の名称

第18期 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 報告「人類社会に調和した原子力学の再構築」

## 2. 内容

### (1) 作成の背景

20世紀後半、わが国において、原子力平和利用に係る研究・開発は進展し、原子力発電および研究用原子炉、加速器、放射性同位元素などの利用は、医療、産業など広範囲にわたって国民生活を支えるに至った。しかしながら21世紀初頭にあたり、改めて原子力平和利用の現状を見ると、安全面における科学技術上の問題だけでなく、原子力に携わる技術者の行動、社会との関わり等における問題が数多く生じ、国民の不安感や不信感が著しく増すなど、憂慮すべき状況にあり、早急に検討のうえそれらの解決が求められている。

このような背景のもとで、従来の原子力学からパラダイム転換を図り、人類社会に調和した原子力学として再構築し、それに沿った学術としての進め方と教育の在り方を中心に今後の方策を探索した。

### (2) 現状と問題点

今日原子力の社会との乖離が増すとともに、原子力の利用のみならず研究や開発は沈滞し、それに加えて原子力を志望する学生数も減少し、原子力学の研究ならびに教育と人材養成は危機に瀕している。原子力学は本来ミクロの世界の物理学の応用に源を発し、幅広い可能性を有すことに加え、社会とのかかわりが深いにもかかわらず、原子力学の一部分に偏るなど、研究面でも自ら枠をはめ、社会との連携も不十分であった。さらに大学、国公立研究機関および民間の協力体制が十分機能せず、原子力の研究、開発と利用の展開があまり効率的ではなかった。

### (3) 改善策、提言等の内容

- 1) 原子力学の研究者および関連する技術者は、まずその倫理を弁え、社会のための科学技術であることを改めて認識し、これまでの工学の枠組みを超え、人文・社会科学を含む広い分野の人々と連携や協力を図ることが必要である。
- 2) 資源とエネルギーの安定供給と地球環境の保全、ならびに人類社会の持続ある発展にとって、原子力発電とその核燃料サイクルは今後とも重要であるので、国民に理解される形で内容を公開し、説明責任を果たすことにより、社会的受容性を回復することが第一である。

その上で、

- ①原子力の安全性を広く安全学の枠組みの中で強化する。
- ②放射性物質による環境汚染の予防等の研究を重視する。
- ③放射性廃棄物の処理処分などバックエンド対策研究に重点を置く。
- ④将来の原子炉として、革新的原子炉について総合的に研究する。
- ⑤核融合炉開発の基礎研究も原子力学の重要な柱の一つとして取り組む。

3) 加速器や研究用原子炉から得られる量子ビームおよび同位体に関わる基礎研究の推進と広範な分野への展開は、原子力学の重要な一翼として、独創的研究に重点を置いて推進する必要がある。さらに、その成果の中から新しい医療・産業利用などへの萌芽を育て、実用化を図ることも重要である。

4) 若者に夢を与え、優れた人材を確保するため、広く開かれた枠組みの中で原子力学の教育と人材養成を再建する必要がある。これにより、高い倫理性と広い視野と開拓精神を持った人材が育てられる。

一方、既存の原子力施設の技術伝承に対する産業界等からの要請に対しては、関係する大学が協力して「大学横断型原子力工学コース」のような教育組織を設立し、全日本的に対応する必要がある。原子力の開発と利用が盛んな地域の大学に原子力学の教育と研究のセンターを設置することも有益である。

5) 原子力の研究・開発において、従来十分でなかった産学官の連携と協力を推進すべきである。とくに日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新独立行政法人と大学は、研究においてはもちろん、教育と人材養成においても、より積極的に協力する必要がある。

1. 序 言	
1) はじめに	1
2) 原子力の研究、開発と利用の歴史	2
3) 原子力の社会的受容性の変遷	5
4) 原子力学の発展と反省	5
2. 原子力学のパラダイム転換	
1) それ以前に必要なこと、倫理の確立	8
2) 社会のための原子力学の再認識	11
3) 政策のための原子力学の重要性	11
4) 俯瞰的立場から見た原子力学とその理念	12
3. エネルギー学としての原子力学	
1) 地球環境、資源リサイクル、社会の持続ある発展と原子力学	13
2) 安全学・安心学と原子力学	16
3) 新型の原子炉システムの開発	18
4) 核燃料サイクルとバックエンドの確立	18
5) 放射性物質による環境汚染の防止と回復	19
6) 核融合炉の開発	20
4. ミクロ世界にシーズを探索する原子力学	
1) 加速器とビーム工学の展開	21
2) 試験研究用原子炉の利用	21
3) 放射性同位体の新しい利用	22
4) 同位体理工学の可能性	23
5. 原子力学研究開発の進め方	
1) 人文・社会科学との融合、社会との調和	26
2) 広範な理工学分野との連携協力	26
3) 巨大な研究開発機関の役割	29
4) 大学における研究の在り方	30
5) 産学官の協力の進め方	31
6) 地域に根づいた研究開発の可能性	32
7) 国際協力、国際貢献の進め方	33
6. 原子力学の教育と原子力の人材養成	
1) 原子力教育への懸念	34

2) 大学における原子力学教育の現状と今後. . . . .	3 5
3) 研究開発機関における原子力の人材養成. . . . .	3 5
4) 産業界における原子力の人材養成. . . . .	3 8
5) 原子力学教育と原子力の人材養成の再構築. . . . .	3 9
6) 教育訓練用実験施設・設備の必要性. . . . .	4 1
7) 原子力学教育と原子力の人材養成による国際貢献. . . . .	4 1
8) 初等中等教育および一般教育における原子力学の意義と重要性. . . . .	4 1
7. 提 言. . . . .	4 2
8. 結 言. . . . .	4 3

## 1. 序 言

### 1) はじめに

わが国においては、原子力平和利用のための研究と開発を開始するための方針や条件が日本学術会議などで議論されてから約半世紀、核分裂連鎖反応によるいわゆる核エネルギーの利用と放射性同位体や加速器の利用を柱とした原子力工学（原子核工学とも呼ぶ）が主にアメリカから導入され、大学と日本原子力研究所等を中心として研究が推進され、またその教育にも努力が払われて多くの人材が育成されてきた。実際、初めに放射性同位体と研究用原子炉が、のちには発電用原子炉が、工業技術とともに導入され、政府の積極的な政策と予算措置、民間産業の推進および上述の大学や日本原子力研究所等の研究ならびに教育と人材養成上の努力が相まって、順次わが国に根付いた。現在では核エネルギー（一般に原子力と呼ばれる）による電力が全電力量の約3分の1を担い、放射性同位体や加速器は研究から産業の現場のみならず病院での診断や治療に幅広く利用されるに至っている。さらに新しい核エネルギーとしての核融合炉の開発についても、これまでのわが国の核融合研究の実績と国際協力の枠組みのなかで国際熱核融合実験炉（ITER）を国内に招致する方針が決まり、その成行きが注目されている。

しかしながら、21世紀の初頭にあたり、改めて原子力平和利用の現状を客観的に見ると、時代の変革期にあって、原子力に関連する学術（以下より広く原子力学と呼ぶ）の研究と教育が厳しい転換の淵に立っており、一方、科学技術を押し進める側の行動、社会との関わりなどにおける諸問題が多数顕在化し、原子力利用に対する国民の不安感や不信感を著しく増大させるなど、早急に検討を加えて解決すべき点が多々存在していることが認められる。したがって、今後の原子力平和利用の在り方や進め方について検討するさいには、そのような点について深く考察する必要がある。とくにいわゆる原子力は、巨大システムであり、安全性が強く求められることから、厳しい安全規制に律せられた総合的科学技術として、一般社会からはもちろんときには他の技術分野から見ても関わり難く、また見通し難い分野との印象を持たれるなど、互いに乖離して行った状況がある。このことは学術としての原子力学においても逃れられないところが一部あり、原子力学研究の在り方および教育と人材養成の在り方について、また他の学術分野や広く社会の意見も聴きながら、じっくりと考え、今後の方策を練るべき時機にあるといえる。

今期（第18期）の日本学術会議原子力工学研究連絡委員会とエネルギー資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会（以下原子力工学研連等と略称）では、今期の日本学術会議における二つの方針（人類的課題解決のための日本の計画および学術の状況ならびに学術と社会との関係に依拠する新しい学術体系の提案）に沿い、俯瞰的な視点に立ち、人文・社会科学との融合や協力の考え方を参考にしながら、原子力平和利用に関わる広い学問分野としての原子力学について、パラダイムの転換を含む今後の在り方、その内容、教育と人材養成に関する調査、検討を進めてきた。

その過程では、広く産業界や官庁の方々を交えたシンポジウムを開催し、人文・社会科学研究者の協力も仰いだ。また、これまで原子力関係の学科や専攻がなかったが現在その設置を計画または検討している大学の関係者を招き意見を聴取した。

本報告書は、以上のような検討の結果を取りまとめたもので、序言から始まり、原子力学のパラダイム転換、エネルギー学としての原子力学、ミクロ世界にシーズを探索する原子力学、原子力学研究開発の進め方、原子力学の教育と原子力の人材養成について述べ、提言としてまとめている。

## 2) 原子力の研究、開発と利用の歴史

わが国で原子力平和利用が本格的に開始したのは1960年代であり、核エネルギーについていえば1970年代であるが、放射性同位体や加速器の研究は、第2次世界大戦以前に大学や理化学研究所で開始され、戦争中にはウランの軍事目的への利用の可能性についても検討されている。そうしたバックグラウンドもあり、アメリカ軍による広島と長崎への爆弾投下直後には、理化学研究所や大学の研究者が広島や長崎へ学術調査に赴き、中性子による誘導放射能を検出してそれが原子爆弾であったことを実証した。それとともに数多くの被爆者の治療と調査が行われ、わが国の放射線影響の研究がスタートした。

世界とわが国における原子力の研究、開発と利用に関する重要な事項を年表として表1に示す。年表にも示される70年代後半から80年代にかけての内外におけるいくつかの事故は、次節に示すように国民世論の傾向を変え、国の政策や地方自治体の行政にも影響を与えてきた。一方、わが国の原子力発電および放射性同位体利用に関する傾向は、それぞれ図1、図2に示すように、絶えず改良、改善の努力が払われた結果、現在、原子力発電は総電力量と設備利用率がそれぞれ約3分の1と約80%に到達し、放射性同位体を利用する事業所数は約5,000にもなっていることが分かる。

表1 世界とわが国における原子力の重要事項の年表

世界のできごと (年、国)	わが国のできごと (年)
核分裂の発見 (38、独)	原子爆弾の被爆、調査 (45)
原子炉の完成 (42、米)	原子力研究の禁止、連合軍理研などのサイクロトロン破壊 (45)
原子爆弾完成、実験次いで日本に投下 (45、米)	日本学術会議設立 (49)
	講和条約 (51)
ソ連原子爆弾完成 (49、ソ)	第5福竜九ピキニの降灰を受け乗組員被曝 (1名死亡)、調査 (54)
小規模原子力発電 (51、米)	日本学術会議、原子力について平和利用の厳守と3原則決定 (54)
英国原子爆弾完成 (52、英)	原水爆禁止運動盛り上がり、署名1,200万余 (54)
原子力潜水艦進水 (54、米)	内閣に原子力平和利用準備調査会発足 (54)
水素爆弾完成、実験 (同上)	
原子力発電所完成 (54、ソ)	
原子力平和利用開始 (54、米)	
原子力平和利用決議 (54、国連)	



第1回原子力平和利用国際会議(55、国連  
(スイス))

欧州原子力共同体(ユーラトム)発足(56、欧)  
コールダーホール原子力発電所完成(56、英)  
沸騰水型実験炉(56、米)

国際原子力機関IAEA発足(57、国際)  
ウインズケール原子力発電所で事故(57、英)  
ショッピングボートで加圧水型炉完成(57、米)

中国最初の研究炉完成(58、中)  
国連科学委 放射能影響調査を公表(58、国連)

国際放射線防護委員会ICRP放射線許容量新勧  
告(59、国際)  
原子力船レーニン号完成(59、ソ)  
ドレスデンで沸騰水型炉完成(60、米)

移動発電炉ML-1完成(61、米)  
原子力貨客船サバンナ号完成(61、米)  
南極で発電炉臨界(62、米)  
Pu燃料原子炉EBR-1臨界(62、米)  
原子力潜水艦スレッシャー号沈没(63、米)  
大型高速増殖炉エンリコフェルミ臨界(63、米)

初の原子力灯台完成(64、米)

中国原子爆弾完成(65、中)  
フランス原子爆弾完成(66、仏)

水爆搭載機墜落(68、米→グリーンランド)  
原子力貨物船就港(68、独)

原子力心臓ペースメーカー実用化(70、仏)  
高速実験炉ドーンレイでNa火災(70、英)  
軽水炉緊急炉心冷却装置ECCSの欠陥問題  
(71、米)  
商用高速増殖炉完成(72、ソ)  
17億年前オクロで天然原子炉の存在を発表  
(72、仏)  
ネーダー原子力発電所反対(73、米)

平和利用目的と称して地下核実験(74、印)  
ラスムッセン報告(74、米)

矢内原東京大学総長、茅日本学術会議会長 大学  
の研究の自由について申し入れ(55)  
(財)日本原子力研究所設立(55)  
原子力基本法等成立(55)  
日米原子力協定(55)  
原子力委員会発足(56)  
科学技術庁発足(56)  
日本原子力研究所特殊法人化(56)  
原子燃料公社発足(56)  
文部省 大学における原子力研究者養成3ヵ年計  
画(56)  
3大学大学院に原子核工学専攻開設(57)  
放射線障害防止法、原子炉等規制法成立(57)  
最初の研究炉JRR-1臨界(57)  
日本学術会議「発電炉開発長期計画」を批判  
(57)  
コールダーホール型炉耐震性に問題(57)  
日米、日英 原子力協定(58)  
理化学研究所特殊法人化(58)  
日本原子力学会創立(59)  
日加原子力協定(59)  
原研でPu分離に成功(59)  
日本学術会議 プラズマ研究所設置を決定(60)  
関西原子炉の敷地決定(60)  
原子力損害賠償法成立(60)  
文部省大学の原子力、原子核関係学科拡充改組を  
決定(60)

Pu調査団米国へ派遣(62)

日本原子力船事業団 特殊法人として発足(63)  
最初の発電炉JPD-R発電(63)  
原研労使紛争多発(63～)  
原子炉立地審査指針(64)  
京大原子炉KUR臨界(64)  
電力会社で原子力発電所建設準備進む(64～6  
5)  
原電東海発電炉臨界(65)

動力炉核燃料開発事業団(動燃)発足(67)  
新日米原子力協定(68)  
米原子力潜水艦奇港の佐世保で異常放射能  
(68)  
日本学術会議 この件につき声明(68)  
原子炉による脳腫瘍治療(68)  
Puに関する目安線量の指針(69)  
商用原子力発電所3基営業運転開始(70～  
71)  
放射線滅菌開始(71)

ジャガイモ放射線照射許可(72)  
日本学術会議 原子力問題シンポジウム開催  
(72)  
伊方原子力発電所反対行政訴訟(73)(このの  
ち行政訴訟多発)  
日本分析研究所 放射能測定データねつ造(74)  
原子力船むつ出力上昇試験中に放射線漏れ(74)

国際エネルギー機関発足（74、国際）  
ブラウンズフェリー発電所で火災（75、米）

再処理凍結と高速炉開発の延期（77、米）  
国際核燃料サイクル評価（INFCE）（77、国際）

TMI原子力発電所2号機で冷却水喪失事故、調査委が勧告（79、米）  
映画チャイナシンドローム（79、米）

原子力国民投票、25年後を目標に原子力発電所を徐々に廃止（80、スウェーデン）  
高速増殖炉計画停止（81、米）  
核施設への軍事攻撃禁止決議（81、国連）  
中国IAEAに加盟（84、国際）

チェルノブイリ原子力発電所4号機で大事故（86、ソ）  
原子力事故早期通報・相互援助条約（86～87、国際）  
多目的研究炉完成（87、インドネシア）  
放射線被曝事故（87、ブラジル）

原子力の段階的撤退の社民党勝利（88、独）  
世界原子力発電事業者協会（WANO）設立（89、国際）

国際原子力事故尺度設定（90、国際）  
原子力発電所の寿命延長（90～、米）  
OECD東欧炉の改善勧告（91、国際）

中国、フランス核拡散防止条約（NPT）に加盟（92、中・仏）  
放射性廃棄物の海洋投棄全面禁止（93、国際）  
原子力安全条約（94～96、国際）

IAEA総会 核実験禁止を決議（95、国際）

パーセベック原子力発電所閉鎖を決定（97、スウェーデン）  
高速増殖原型炉スーパーフェニックスの停止（97、仏）  
放射性廃棄物安全管理条約（97、国際）  
KEDO北朝鮮で軽水炉事業の起工（97、国際）  
地下核実験（98、印・パキスタン）  
反原子力政権（社民党とみどりの党）発足（98、独）

高レベル放射性廃棄物最終処分場候補地選定（99、フィンランド）  
生肉、冷凍肉、肉加工食品の放射線滅菌を解禁

同上 問題調査委員会（75）  
原子力委員会に核融合会議を設置（75）  
科学技術庁原子力安全局が発足（76）  
高速実験炉「常陽」が臨界（77）  
東海再処理施設の運転に関し日米協議が妥結して運転（77）  
原子力安全委員会が発足（78）  
米国のTMI原子力発電所の事故に鑑み、国内で総点検、52項目の教訓（79）  
原子力安全委員会と日本学術会議の合同シンポジウム（79）  
原子力防災指針（80）  
人形峠でウラン濃縮進展（80）  
原電敦賀発電所 放射能漏れ事故（81）

日本原燃産業発足（85）  
原子力船事業団 原研に合併（85）  
日中原子力協定（86）  
チェルノブイリ原子力発電所事故で微量の放射性降下物（86）  
チェルノブイリ原子力発電所事故調査報告（87）  
原子力委員会 原子力は基幹エネルギーと位置付け（87）  
核物質防護条約（88）  
東京電力福島第二原子力発電所3号機 再循環ポンプ破損事故（89）  
放射線によるウリミバエ根絶事業（89）  
原子力船むつ 洋上試験（90）  
関西電力美浜発電所2号機 蒸気発生器細管破断事故（91）  
日ソ原子力協定（91）  
民間の再処理会社（日本原燃）発足、低レベル廃棄物埋設センター操業開始（92）

ロシアによる日本海での放射性廃棄物投棄問題（94）  
放医研重粒子線治療開始（94）  
高速増殖原型炉もんじゅでNa漏れ事故（95）  
日本学術会議 上記事故でシンポジウム（96）  
新潟県巻町で原子力発電所立地の是非の住民投票、反対61%（96）  
動燃事業団 アスファルト固化施設で火災爆発事故（97）  
気候変動枠組み条約第3回会議COP3京都で開催（97）  
ブルサマル実施への動き（97～）（その後トラブル続く）  
日本弁護士連合会Pu利用反対決議（98）  
核燃料サイクル開発機構発足（98）  
使用済燃料輸送容器遮蔽材データ改ざんが判明（98）  
原研 高温工学試験研究炉臨界（98）  
（株）JCOで臨界事故、従事者2名死亡、周辺住民の避難と自宅待機（99）  
同上 事故調査委員会報告（99）

<p>(99、米国)</p> <p>EU加盟国電力自由化(～00、国際)</p> <p>中国が輸出した原子力発電所完成(00、パキスタン)</p> <p>米国での同時多発テロにより、原子力施設の防護強化(01、国際)</p> <p>議会が放射性廃棄物最終処分場決定、州政府は反対(02、米国)</p>	<p>原子力災害対策特別措置法成立(99)</p> <p>高レベル放射性廃棄物の処分実施主体、原子力発電環境整備機構発足(00)</p> <p>省庁再編、原子力安全・保安院発足(01)</p> <p>日本原子力学会 倫理規程制定(01)</p> <p>東京電力原子力発電所自主点検記録の不正発覚(02)</p>
--	---

(原子力年鑑 2001/2 日本原子力産業会議を参考に一部追加)

### 3) 原子力の社会的受容性の変遷

原子力の研究と開発を開始し、その利用への途を進めるさいに、日本学術会議は平和利用の厳守と民主・自主・公開の原則を打ち出した。これらは国民に理解され広く支持を得て、原子力基本法の中に盛り込まれた。その後、政府主導の下で研究と開発が実施され、さらに民間ベースで発電用原子炉の設置の準備が開始される段階においても、マスメディアを含めて大方の世論は前向きで、社会的受容性は高かった。しかしながら例外はあり、日本学術会議が支援した関西原子炉(のちに京大炉、KUR)の敷地選定には迂余曲折があり、最終的には地元の誘致と大阪府の協力でようやく決着したこと、一部の私立大学や民間会社の試験研究用原子炉が目の目を見なかったこと、さらに少しあとになって原子力発電所建設予定地の周辺で反対運動が起こり、訴訟に至ったことなどがある。

その後、わが国では原子力発電所の建設が進み、核燃料サイクルの自立を目指して、使用済燃料の再処理とプルトニウムの利用、さらには高速増殖炉の開発が進められてきた。しかしアメリカと旧ソ連(現ウクライナ)の原子力発電所で大きな事故があり、またわが国の原子力発電所と核燃料サイクル関連施設での事故とその対応において、通報の遅れ、公開の不十分さ、さらには倫理性が問われたことなど多々あり、原子力の社会的受容性は大きく低下した。加えて、マスメディアがスウェーデンやドイツなどの原子力発電からの撤退の方針を、世界的な趨勢として、大々的に伝えたことによりその傾向は一層増幅された。マスメディアの論調そのものも賛成と支援から反対と批判へと変化してきている。しかし一方では、国民の多くが、原子力発電に対する不安を抱えながらも、その必要性を認めるとする統計結果があることも見落としてはならない。それらを図3～図5に示す。

### 4) 原子力学の発展と反省

多くの分野の学術と技術が明治時代に欧米から輸入された。とくに工学は富国強兵の国策に沿って発展し、やがて世界的な水準に達し、今日まで産業の発展を支えてきた。一方、原子力工学は、アイゼンハワー米大統領の国際連合での原子力平和利用の宣言ののち主に米国から輸入され、原子力平和利用の国策に沿って、大学、日本原子力研究所、民間の研究所等を中心として研究が推進されてきた。また、

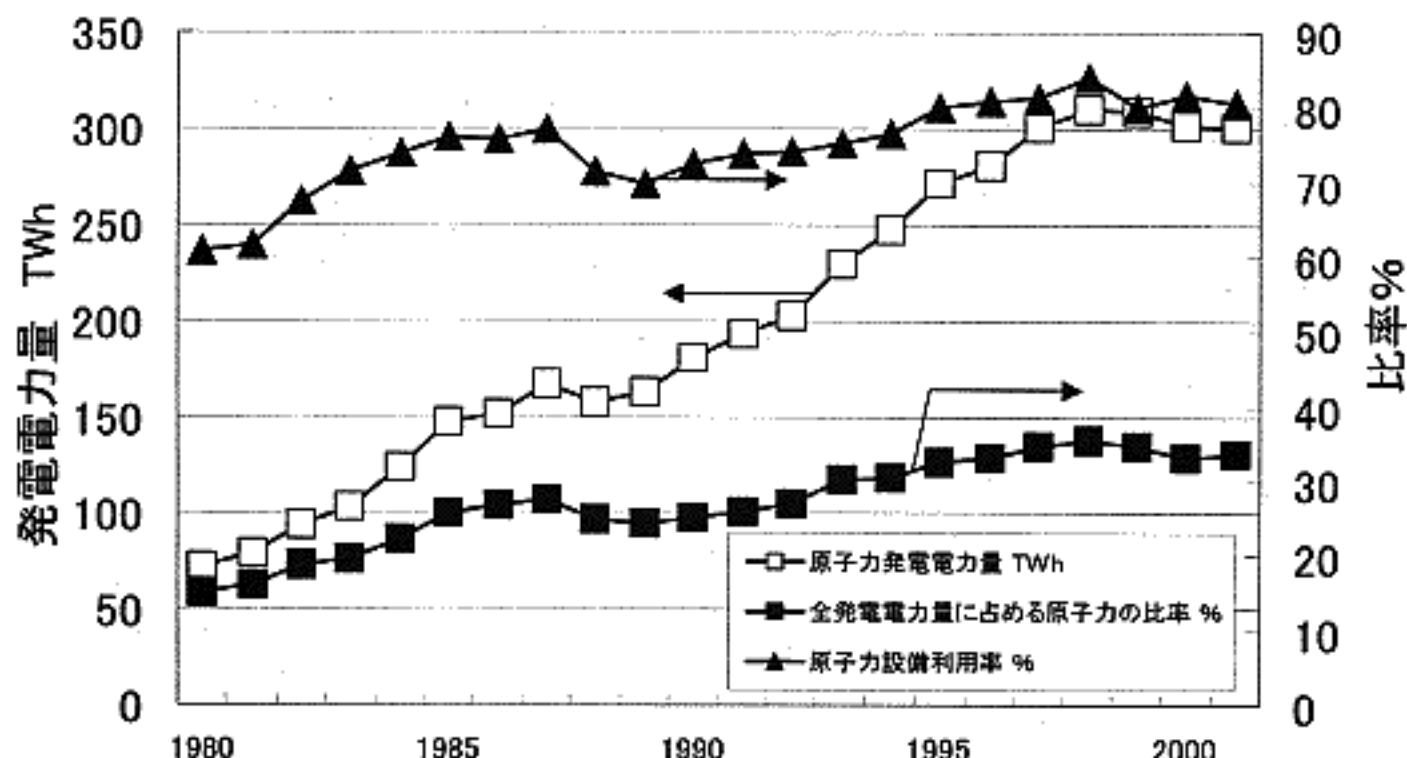


図1 我が国の原子力発電電力量、全電力量に占める原子力比率と原子力発電所設備利用率  
(出典 電気事業連合会ホームページ「電力統計情報」、通商産業省資源エネルギー庁編、「平成12年度版原子力発電所運転管理年報」他)

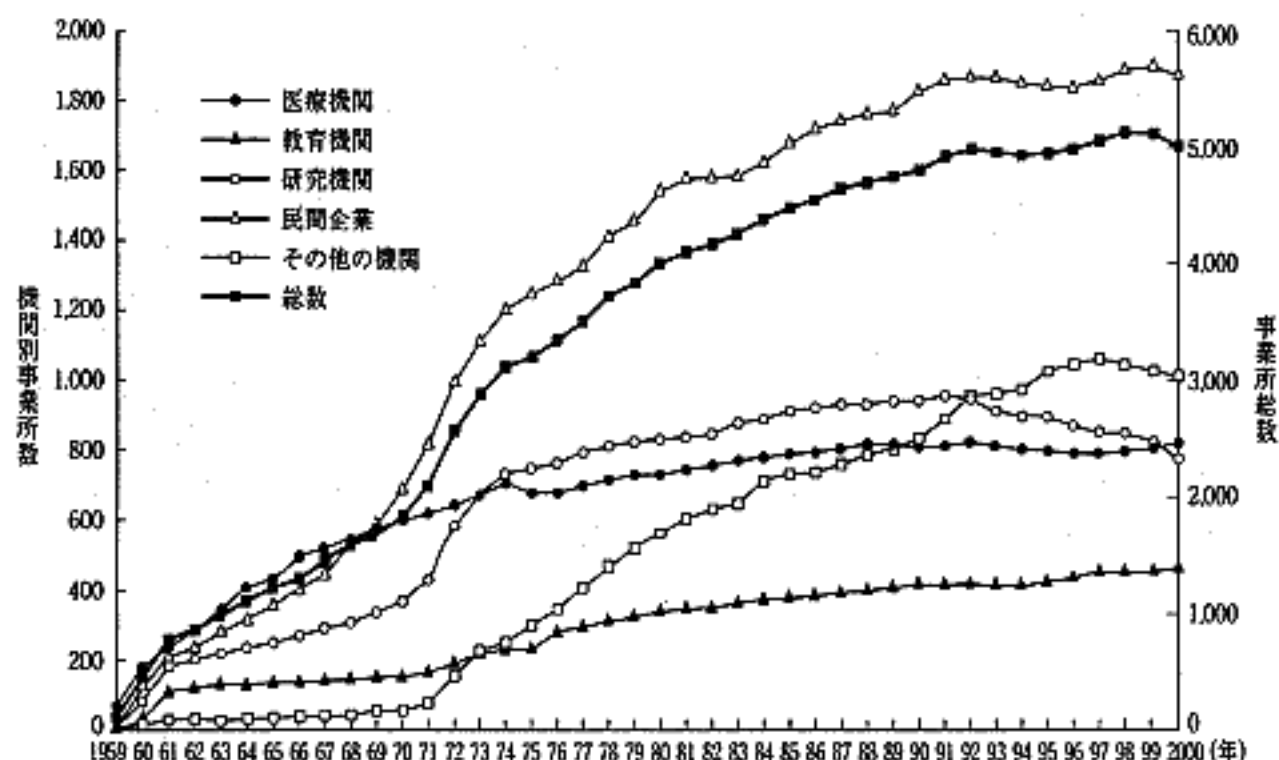


図2 放射性同位元素の使用許可・届出事業所数の年度推移  
(出典 「原子力年鑑2001/2」、日本原子力産業会議)

その教育にも努力が払われて多くの人材が育成されてきた。当初は、放射性同位体、放射線計測器、研究用原子炉（燃料付き）などがすべて輸入に依存するとともに、多くの研究者や学生が米国などに留学し、原子力工学を学習した。その後、発電用原子炉についてもイギリスとアメリカから輸入された。

日本原子力研究所等には潤沢な予算措置が講じられ、研究用原子炉を筆頭に数多くの施設設備が設置された。大学に対しても他の学術分野に比べると多額の予算が配当され、学科や専攻の新設、研究設備の充実が図られた。また関連する大学附置研究所や研究施設・センターも順次設置された。民間会社でも原子力関連の研究所を次々と併設した。こうして、原子力工学の分野に多くの研究者と学生が参入して、研究が順調に推進されることとなった。当初輸入学であった原子力工学が、やがて優れた研究成果を自ら生み出し、それらが原子力平和利用の現場に生かされるが多くなった。たとえば、原子力発電の開始後しばらくして多発し、設備利用率を著しく低下させた構造材料の応力腐食割れに対しては、研究機関や大学が産業界に協力して問題を解決し、設備利用率の改善に寄与したことがある。このようにしてわが国の原子力工学の研究は世界でも最高の水準に到達したといっても過言ではなからう。

しかしながら、電力量の約3分の1を支えるまでになり、定着したとされる軽水型原子力発電所、完成に近づきつつある商業燃料再処理施設、とともにそこで発生する高レベル放射性廃棄物の処分を中心としたバックエンド対策などに関連して未だ残された課題がある。さらに、安全性がより高く、熱効率も改善された軽水型原子炉、プルトニウムの燃焼と増殖から長寿命のマイナーアクチニド核種の核転換処理までも含む高速炉システム、水素利用システムの可能性や燃料の再処理を必要としない高温ガス炉、中小型の固有安全炉等革新的原子炉の開発研究から、トリウム燃料サイクルに関する基礎研究、さらに核融合炉の設計やその材料開発の研究など、今後改めて取り組むべき課題は多いと考えられる。

最近、放射性同位体の利用に加えて各種の加速器の利用が非常に盛んになってきた。本来原子力工学は、原子核反応の工業的利用からスタートしており、応用原子核物理学の色彩が強かったが、その後多くの理工学分野の協力を得た総合工学として発展し原子力平和利用を支えてきた。しかし原子力学としては、ここで改めてミクロな科学の世界に回帰し、新たな学問的シーズを求めることも必要であろう。また一方、その研究成果の中から新しい産業の萌芽を育て実用化を図ることも重要である。原子力工学の研究がスタートした時点で、原子炉や核燃料サイクルに関連することに集中したことは理解に難くないが、学術としてあまりにもそれらに把われすぎたために、原子力学の持つより広い可能性の探求が疎かになってきたのではなからうか。率直にいうならば、原子核物理学からさらに素粒子に関連する物理学およびナノスケールにおける物質の物理・化学との交流やその応用への努力が不足していたことは否めない。それと共に、原子力をめぐる政治・社会・経済・人間科学

等を扱う人文・社会科学研究者との交流や協力も不足していた。広い意味での原子力学は、科学技術的側面のみならず人文・社会科学との連携や協力が不可欠である。このような認識の下で、たとえば、日本原子力学会では1999年に社会環境部会が発足しているが、人文・社会科学との連携はまだ十分とはいえない。

原子力工学より広い学術である原子力学の発展のためには、以上の反省を踏まえて、今後どんな課題があり、何をなすべきか、また何ができるかなどについて、改めて考える必要があるのではなかろうか。

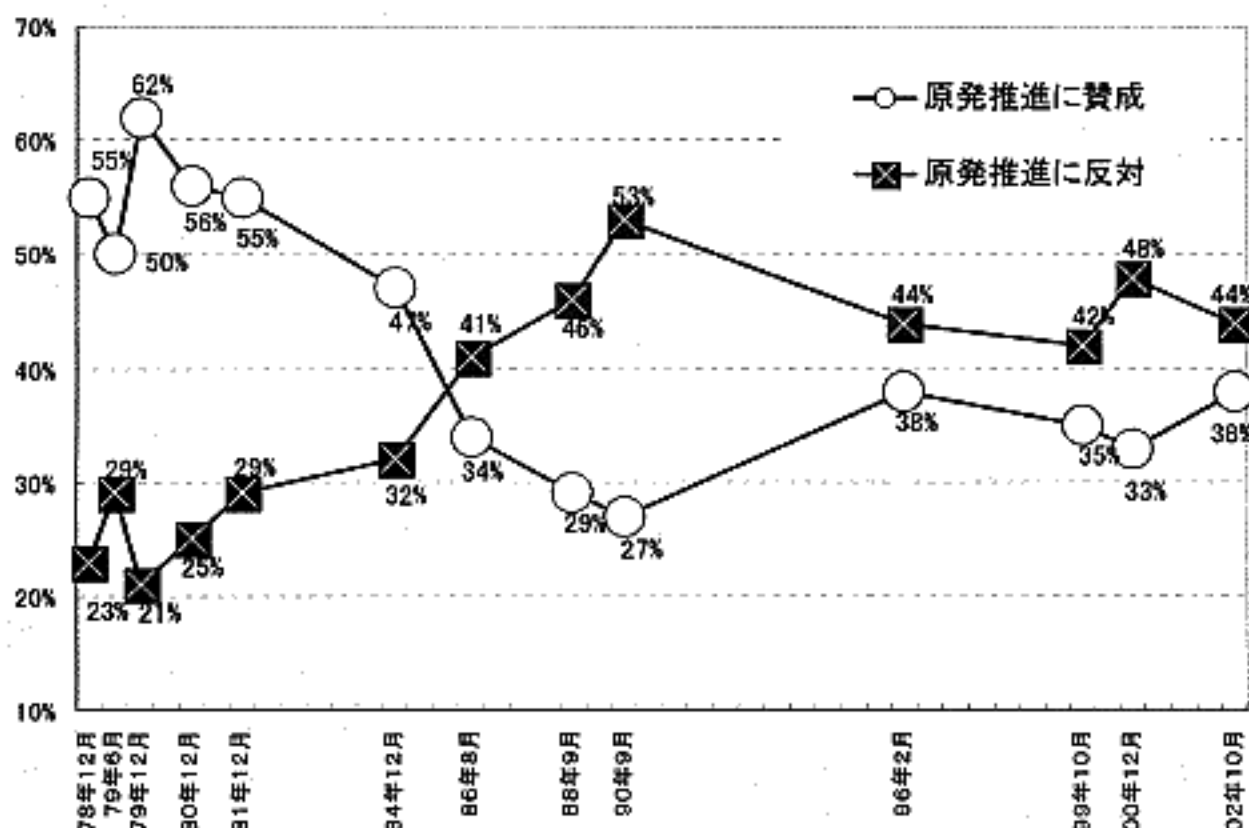


図3 原子力発電に対する世論の推移(1) (朝日新聞社、1978年～96年は柴田鐵治、友清裕昭「原発国民世論」ERC出版(1999年)を参照。それ以降は同社の調査結果をプロットした。なお、99年と02年は電話調査、それ以外は面接調査による。)

## 2. 原子力学のパラダイム転換

### 1) それ以前に必要なこと、倫理の確立

わが国の原子力利用は、厳しく平和の目的に徹し、民主・自主・公開の三原則の遵守を掲げている。それとともに安全を第一とし、国が厳格適正に規制することになっている。すなわち、原子力とくに核エネルギーは、当初軍事目的で開発され、わが国はその惨禍を受けており、また平和利用であっても事故が起これば放射性物質で環境を汚染する可能性があるため、国が厳しく安全規制し、訓練された科学者や技術者がこれを担当することになっている。それゆえ、原子力を担当する科学者や技術者には、この災禍を招く可能性があるものを扱う「選ばれた者」としての自



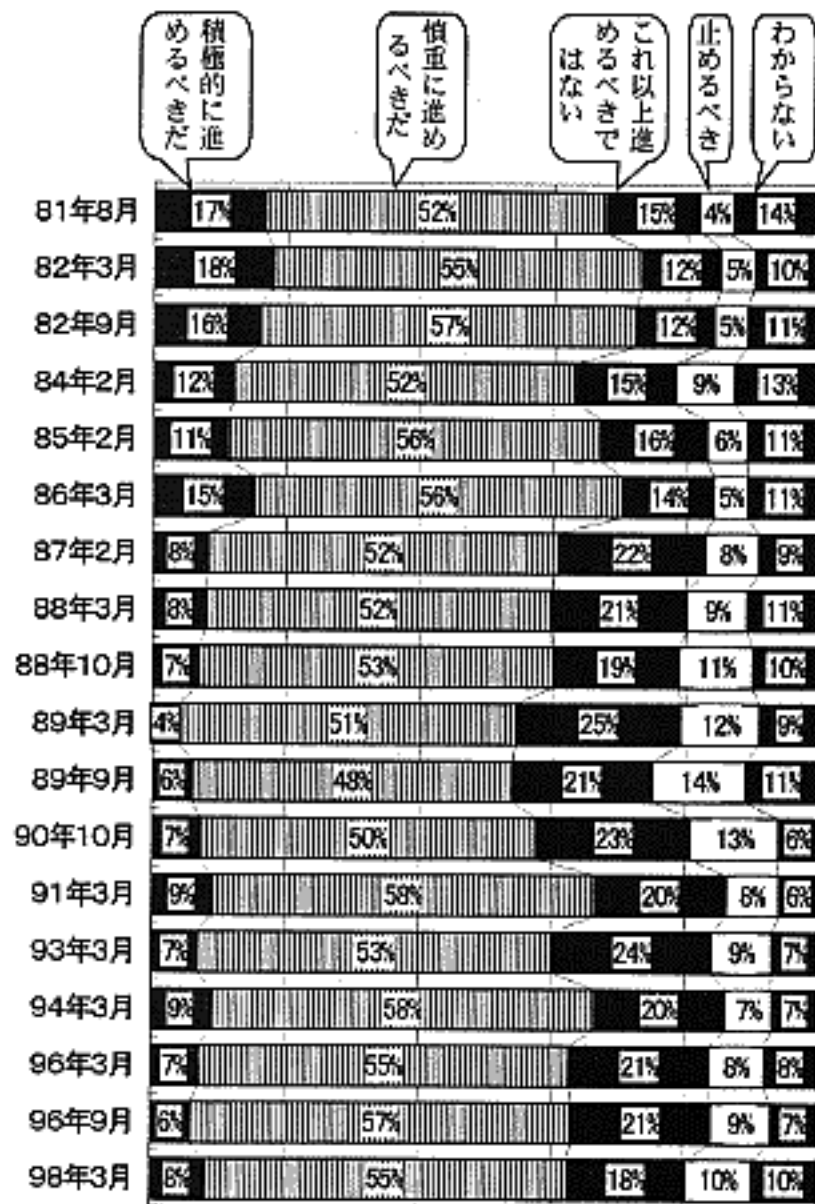


図4 原子力発電に対する世論の推移（2）  
（NHK、図3と同じ文献を参照）

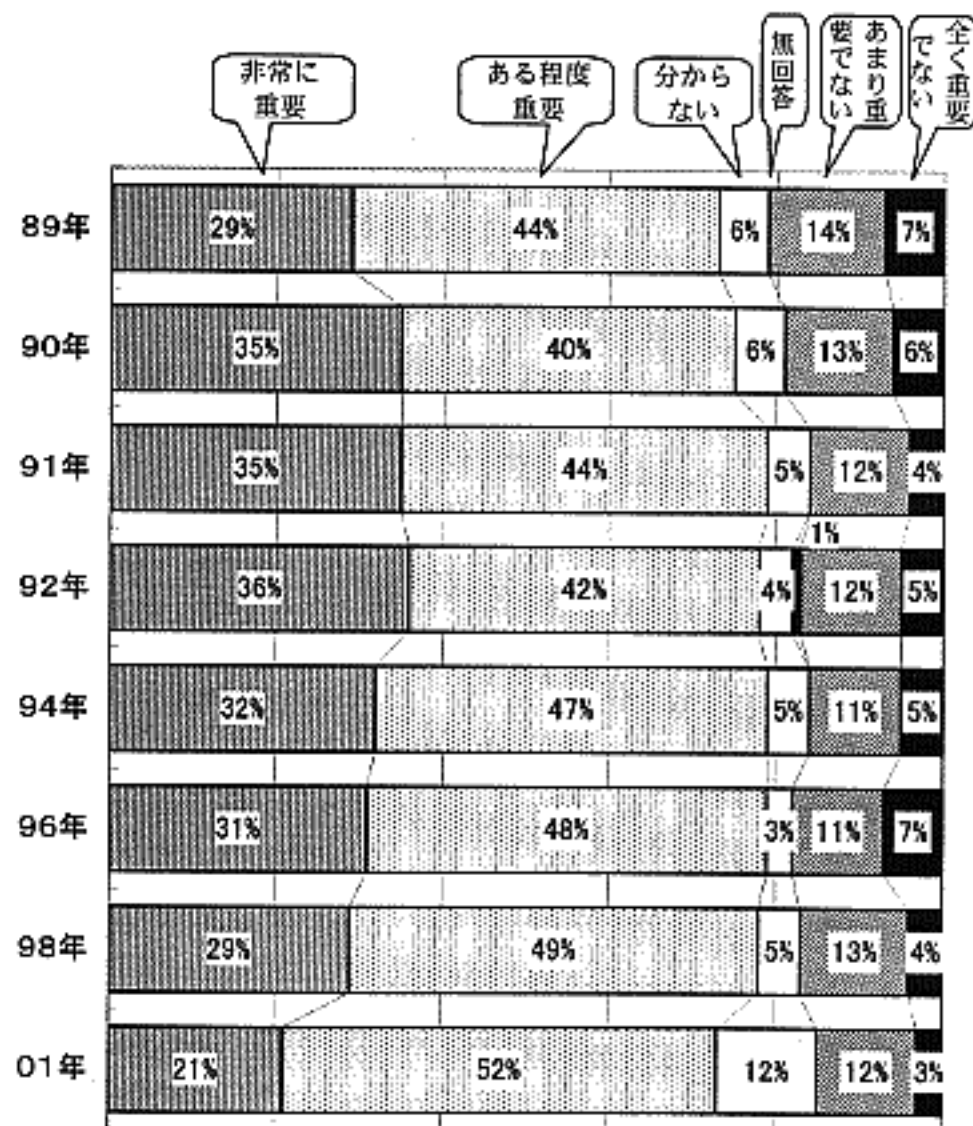


図5 原子力発電の重要度に対する世論の推移  
（社団法人エネルギー・情報工学研究会、同会議「エネルギー・原子力に関する世論調査と国際比較」報告書（2001）を参照し、一部描き直した。）

覚が暗黙のうちにあったが、最近の原子力関係の故障や事故においては、それが脆くも崩れるような事態が発生している。とくに、1999年の（株）JCOの臨界事故においてそれが顕著である。それ以前から日本原子力学会では、倫理規程制定の必要性が唱えられていたが、この事故を深刻に受けとめて、2001年に倫理規程とそれに付随する行動の規範を定めた。これは原子力学のパラダイム転換の第1歩ともいえるし、またパラダイム転換以前に必要なことであったともいえよう。ここに同学会の倫理規程の憲章部分を引用する。

2002年8月東京電力が原子力発電所の不具合情報を隠匿し、一部データの改ざんまで行っていたことが判明した。これは法規に違反するとともに、明らかに本倫理規程・憲章に違背している。原子力科学技術者に対する倫理教育はきわめて重要であり、大学のカリキュラムの中に順次取り入れられつつあるが、原子力の研究開発機関、行政や産業界の教育訓練にも取り入れて、今後このような事態を招かないよう最大限の努力をすることが望まれる。

### 日本原子力学会倫理規程前文と憲章

原子力が人類に著しい利益をもたらすとともに、大きな災禍をも招く可能性があることを我々は常に深く認識し、原子力による人類の福祉と持続的発展ならびに地域と地球の環境保全への貢献を希求する。そのため原子力の研究、開発、利用および教育に取組むにあたり、公開の原則のもとに、自ら知識・技能の研鑽を積み、自己の行為に誇りと責任を持つとともに常に自らを省み、社会における調和を図るよう努め、法令・規則を遵守し、安全を確保する。これらの理念を実践するため、我々日本原子力学会員は、その心構えと言行の規範をここに制する。

#### 憲章

1. 会員は、原子力の平和利用に徹し、人類の直面する諸課題の解決に努める。
2. 会員は、公衆の安全を全てに優先させてその職務を遂行し、自らの行動を通じて公衆が安心感を得られるよう努力する。
3. 会員は、自らの専門能力の向上に努めるとともに、関係者の専門能力向上についても努力する。
4. 会員は、自らの能力の把握に努め、その能力を超えた業務を行うことに起因して社会に重大な危害を及ぼすことがないよう行動する。
5. 会員は、自らの有する情報の正しさを確認するよう心掛け、公開を旨とし説明責任を果たすよう行動する。
6. 会員は、事実を尊重し、公平・公正な態度で自ら判断を下すよう努力する。
7. 会員は、本憲章の他の条項に抵触しないかぎり、専門の業務に関し契約のもとに誠実に行動する。
8. 会員は、原子力に従事することに誇りを持ち、その職に与えられている榮譽を高めるよう努力する。



## 2) 社会のための原子力学の再認識

原子力が人類社会にもたらした利益は大きく分けて二つある。その第一は、核エネルギーの利用である。核分裂連鎖反応を制御しつつ運転する原子炉により、少量の燃料で従来の化学エネルギーなどに比べて数桁も大きいエネルギーを取り出すことができる。その第二は放射線や加速器の利用であり、理工学の研究開発や産業利用はもちろん、人間生活に密着した医療や農業の現場でも幅広く用いられている。

一方原子力利用は大量破壊兵器として用いられると共に、放射線による大量被曝と人工放射性物質による環境汚染を人類社会に持ち込んだ。これまでも顕著な発明のなかには、大きな利益と共に大きな危険性を潜在的に併せ持つものは少なくないが、原子力の場合その両者がきわめて大きいことが特徴である。原子力学の研究を進めるさいに常に心すべきことであり、それが前項で述べたように、まずは倫理から始まるという理由である。日本学術会議において Science for Society の理念が改めて強調されているなかで、原子力学に取り組む者は、とくに、その潜在的危険性について熟慮し、「何が真に社会のためか？」について、深く考えるべきであろう。またこうした考え方や問いかけは、原子力学の教育の中にも取り入れて若い人にも伝えるべきであろう。

## 3) 政策のための原子力学の重要性

前述のように、わが国が原子力に関する研究と開発を始めるにあたって、日本学術会議は平和目的の厳守と三原則を打ち出し、それが原子力基本法の中に盛り込まれた。これは現在日本学術会議で唱えられている Science for Policy の嚆矢であった。また一方、大学で進めるべき原子力の研究は、原子力委員会が計画を立てて科学技術庁（当時）や通商産業省（当時）が推進する原子力の研究や開発とは、一線を画すという方針も示された。これは矢内原原則として知られている。これにより、以後の日本学術会議は、主として大学における原子力研究や教育の問題について調査検討を行い、勧告や外部報告を出してきた。しかし、かつて原子力基本法を先導したように、わが国の原子力政策全体を取扱いその方針や原則にまで言及することは少なかった。確かに原子力委員会の存在、その後の原子力安全委員会の発足により、原子力を担当する官庁が強化され、またよく機能し、産業界も原子力発電を中心に発展してきたなかで、日本学術会議が関与すべき、また関与できる領域は大学のこと以外ほとんどなかったともいえる。しかも大学の原子力研究の方針でさえ主として文部省（当時）の学術審議会が出すようになった。また、国際原子力機関（IAEA）や欧州経済協力機構（OECD）の役割や原子力に関する各種国際条約や協定等の締結に関連したわが国の政府の国際活動に対しても、日本学術会議はほとんど何の役割も果たすことができなかった。ただ最近になって、核燃料サイクルの研究開発の現場で事故が多発し、その技術的内容や、経営的な問題にまで遡った調査が行われ、その改善策が求められるさいに、日本学術会議会員や特に役員が個人の立場で調査委員会等に参加し、意見を述べたり、取りまとめたりするこ

とが多くなってきた。それらを通じ、たとえば第17期における対外報告「安全学の推進」というような形で研究・開発が促進され、日本学術会議の活動が間接的に行政に反映されることもあったが、やはり消極的な行動であったといわざるをえない。

21世紀を迎えて、今後の原子力の在り方が問われているなかで、原子力学の研究に携わる者としては、これまで通りその身近なこと、とくに大学を中心とした研究環境や予算等の問題ばかりでなく、より広く原子力に関する研究、開発および利用の在り方、国の政策や国際関係の方策等について、本格的に調査し、検討していくことが必要と考える。日本学術会議の先人たちが苦勞して原子力基本法を先導されたように、広義の原子力の政策について深い関心を抱き、建設的な意見を発信することは社会における原子力学の役割を明確にする意味でも重要であり、日本学術会議の中で原子力学の分野を分担する者の責務でもあろう。

#### 4) 俯瞰的立場から見た原子力学とその理念

最近では既存の学問分野の範疇に収まらない分野が誕生している。これらの中で工学にかかわりの深いものに情報学や環境学がある。第17期の日本学術会議では、「エネルギー学の確立を目指して」や「安全学の構築に向けて」と題する対外報告を行っているが、その標題にこれらはエネルギー学と安全学を冠しており、エネルギー工学や安全工学ではない。取扱う対象の社会的影響や世代にまたがる影響の大きさのゆえに、工学のみという閉鎖系では、もはや解決できない問題を含んでいる状況を反映したものといえる。遺伝子操作など医学・生命に関わる科学技術も同様であり、いずれも新しい学術分野である。

前述のように、原子力利用はその誕生において、人命の大きな犠牲をもたらしたことから、日本学術会議で深く検討され、原子力基本法の中に平和利用の厳守と三原則が盛り込まれ、原子力工学の進め方も規制した。本来、原子力は広く原子力学の範疇で扱われるべきものであったが、核エネルギーの平和利用としての位置付けが明確であったため、国家の重要施策のひとつとして工学の枠組みの中であまり他に目を向けることなく発展してきた。しかしながら今日に至って、他の先端科学技術の展開と同様に、原子力分野においても、より俯瞰的な観点からの価値判断が求められている。このことが工学の枠を超えた原子力学が必要とされる理由である。

全ての学術分野に共通なことであるが、原子力学においても、現状の維持だけではなく、若者に夢を与え、様々な分野の研究者と技術者が原子力を魅力あるものと再認識し、学術としての原子力に新たな火を灯す創造的な展開が是非とも必要である。この展開がなければ、現状の技術のみを考えても、その技術の継承すら困難であり、信頼される原子力技術の構築はおろか、原子力の安全の確保、ひいては核エネルギーの確保は困難をきわめるであろうことは明らかである。

それでは、原子力学に新しい技術の展開はあるだろうか。エネルギー源としての原子力はエネルギー資源の確保、地球環境の保全や長期的なエネルギー・資源対策

という命題に対して、きわめて優れた技術の一つであることは疑いない。発電用原子炉は大型化により経済性を向上し、また、安全性についても、確率論的には、他の技術に比べて些かも遜色がなく、経済性、安全性両面での基盤が確立されていると考えられる。しかしながら、前章で示したように、一般の人々の不安は拭いきれていない。長期的な展望の下で、国民の安心感を醸成するためには、原子力の安全がより普遍的な安全の立場から議論できるような安全学の構築に寄与すると共に、従来よりも優れた安全の原理に基づく革新的技術の展開や、また核不拡散の国際問題に対応できるような面での安全技術の展開を図るべきである。もちろん核融合炉の展開も夢をつなぐ技術である。

さらに、原子力学はその範疇をエネルギー源以外にも広げれば、加速器やビーム応用、プラズマ応用分野において、基礎科学技術の進展に寄与するところが大きく、社会経済的にも、非常に大きな貢献をしている。これらは広く他の学術分野と深く関わっているため、一既に原子力という範疇としては受け止めがたい点があることは確かである。しかしながら、原子力に携わる者はもっと積極的に努力し、主体的に進めるべきものであろう。

社会が何を望むかについて、これまで以上に注意深く見定めた上で、量子科学などミクロな視点での最先端科学を深く追究し、それらを複合した革新的な核エネルギーシステムや量子システムなどによって環境調和型システムの構築を目指し、もって、人類社会の持続ある発展に貢献することが、原子力学の目指すべき理念ではなかろうか。これは、決して原子力から撤退や逃避を意味するものではなく、社会が受容しうる大きな夢のある目標を樹立することにより、その達成を目指すなかで原子力への求心力を高め、その拡大発展と技術継承を不断に行うことにつながるであろう。人類の福祉、安全、環境保全、エネルギーセキュリティ、経済性、倫理性、国際性、夢（直観力、洞察力）、フロンティア科学技術の推進、人材育成や技術の継承というキーワードのもとに、地球社会における原子力学を確立する必要がある。

文部科学省科学研究費補助金については、2003年度以降原子力学はこれまでの複合領域から理工系に分野替えされるが、原子力学の分野の新しい理念とその広がり、表2に示すように、そのキーワードの中で読み取ることができる。

### 3. エネルギー学としての原子力学

#### 1) 地球環境、資源リサイクル、社会の持続ある発展と原子力学

エネルギー資源の需要についての将来予測は、予測困難な因子を多層に含んでおり、非常に難しいにもかかわらず、今世紀については様々な試みがなされている。将来予測の主要因子として、人口増加とその世界的分布、地球環境負荷、経済発展とその世界的分布、交通・情報伝達手法・産業構造の変化、国際情勢、長期的なエネルギー・資源対策、資源の枯渇によるエネルギー供給システムの変化とそれに伴

表2 科学研究費補助金における原子力学の位置づけ

	分野	分科	細目	キーワード
2003 年度以降	工学	総合 工学	原子力学	放射線理工学、加速器・ビーム工学、同位体理工学、炉物理・核データ、燃料・材料・化学、熱流動・構造、原子力計測、安全・リスク・信頼性、燃料サイクル、バックエンド、新型原子炉、保健物理・環境安全、原子力社会環境
			核融合学	
			エネルギー学	
	複合新 領域	環境 学	放射線・化学物質 影響科学	
2002 年度以前	複合領 域	エネ ルギ ー学	原子力学	放射線・粒子線、原子炉物性、原子炉燃料・材料、原子炉工学、システム安全、核燃料サイクル、放射線管理
			核融合学	
			エネルギー学一般	

う新技術開発とエネルギー価格、規制緩和による市場経済の動向、さらにはライフスタイルの変化や文化・価値概念の移行、などがある。これらの因子は互いに絡み合い複層構造をしていることから、現状のごく短期的な外挿を除けば、見通しがつかないというのが正直なところである。長期的には、地球のエネルギーや環境負荷に対する制約が非常に厳しくなり、経済や社会体制あるいは文化・価値概念の変化が避けられない。地球のエネルギーや環境負荷に対する制約をできる限り少なくする目的で、CO<sub>2</sub>排出量が少なく、入出バランスのとれたエネルギー源として、自然エネルギーあるいは循環型エネルギー、つまり短周期的な太陽エネルギー起源のエネルギー形態に移行することが望ましいとの認識がある。しかしながら、希薄拡散型エネルギーの集約化および供給の不安定さという技術的問題とともに経済性の問題もあり、移行期間は相当の年数を要するであろう。一方、核（分裂）エネルギーは、図6に示すようにCO<sub>2</sub>の排出量が非常に少ないので地球温暖化防止上有効で、ごく少量の準国産燃料で済むことからエネルギーセキュリティ性が優れており、さらに一般的にいて経済性も良いため、当面あるいは今世紀の相当の期間にわたりその積極的利用を疎かにすることはできないであろう。

しかしながら、核エネルギーの利用が軍事利用で始まり、また放射線が人体に障害を与えることにより、その平和利用開始にさいしても潜在的に不安を覚える人は少なくなかった。その後、原子力発電は順調に伸びたが、原子力発電所や核燃料施設において事故やトラブルが発生したことにより、第1章で述べたように原子力の

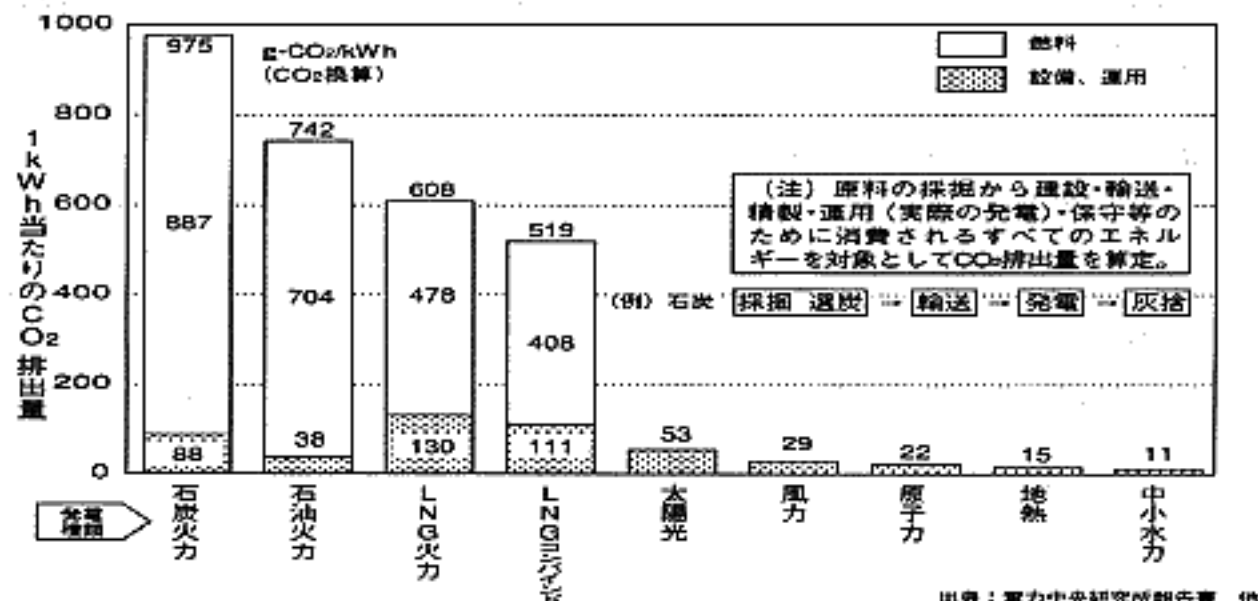


図6 各種の電源別 CO<sub>2</sub> 排出量(電力中央研究所報告書(電中研ニュース338)、同研究所ホームページ「原子力のライフスタイル CO<sub>2</sub> 総排出量(速報値)について」他を参照。)

社会的受容性は低下した。さらに核燃料サイクル施設の建設が進み、そこで発生する高レベル放射性廃棄物の処理処分について、法律が整備され、処分事業主体も発足し、その処分場候補地の公募も始まっているがその見通しは楽観を許さず、こうしたバックエンドが未解決のまま核エネルギーの利用が先行しているとの不備を唱える声も少なくない。それに加えて、(株)JCOや東京電力(株)に見るような企業倫理の欠如に起因する事態もあり、原子力事業者とこれを規制する行政当局への不信も増大している。

このように社会的合意形成が困難ななかで核エネルギーの利用を進めるためには、前章でも述べたように倫理の確立が第一である。その上で、現在わが国の電力量の約3分の1を生産している軽水型発電炉とそのための核燃料サイクル施設の安全性と信頼性の向上を図る必要がある。これについては、第17期の日本学術会議で示された安全学の構築に沿った対応を、原子力学としても考えるべきであろう。中長期的には、従来の軽水型発電炉から離れた新型の原子炉システムについても取り組むことが望まれる。いずれにしてもわが国において、核エネルギーの利用が定着し、社会的にも受け入れられるためには、軽水炉核燃料サイクルの確立すなわちプルトニウムの利用ならびに高レベル放射性廃棄物の処理処分いわゆるバックエンドの問題を解決することが必要不可欠である。さらに、原子力発電と核燃料サイクルはもちろんそれ以外のものも含めて、放射性物質による環境の汚染を防止することが重要であるが、万一汚染が発生した場合には、他の化学物質による汚染と同様に、環境回復を図る必要がある。以上のような核エネルギーの利用に関連した原子力学の新しい課題と在り方について、以下に順次示す。全体を通じて、日本原子力研究所と

核燃料サイクル開発機構が統合して発足する新法人と大学さらには産業界が連携協力して研究を進めることが望まれる。

## 2) 安全学・安心学と原子力学

ここ数年、原子力発電所や核燃料システム施設のみならずいくつかの工業システムや医療の現場で事故が多発し、科学技術のほころびとして認識され、社会的にも注目されている。これに即応して、第17期の日本学術会議では安全に関する緊急特別委員会が設置され、「安全学の構築に向けて」の対外報告がとりまとめられた。この他にも「原子力の利用に伴う安全確保の体制について」、「社会安全への安全工学の役割」等の報告もなされている。

この契機となったのは1999年の(株)JCOの臨界事故であり、これによって原子力に対する社会的受容性は大きく失われ、原子力に対する安心感も非常に低下した。こうした厳しい状況を受けて、原子力学の中でとくに核エネルギーの開発と利用を進めるためには、改めて原子力発電所と核燃料サイクル施設の安全性と信頼性の向上にしっかりと取り組むことが要請される。この場合、従来からの原子力工学的な安全性向上の考え方と手法に囚われず、より広い安全学の考え方と手法を参考にして進めるべきである。もちろん原子力安全工学の方がより先行し、考え方と手法とも緻密で合理的なことも少なくないので、そうしたことでは安全学における議論に参加し、参考に供する努力も惜しんではならない。

原子力発電所と核燃料サイクル施設における安全性と信頼性の向上およびそれによってもたらされる社会における安心感の醸成のために、原子力学として進めるべき課題を以下に列記する。

- (1) 事故に関する情報を収集し、分析し、事故の原因を究明して、対策を立てるシステムを確立する。すなわち事故を調査し、事故に学ぶことが重要である。
- (2) 原子力発電所や核燃料サイクル施設（以下原子力施設と略す）は、ロケットなどと同様に非常に巨大かつ複雑なシステムである。したがって、どこかに弱点があると、部分的に発生したトラブルが全体に波及し、事故に発展する。またこうした巨大で複雑なシステムでは、設計、建設、運転、保修、安全管理に当たる者がそれぞれ分化し、設計の考え方が他の者に伝わり難く、また逆のフィードバックも行われ難い。システム全体を統括し、安全性を確保する方法を探究する必要がある。
- (3) 原子力施設が他の工業システムと異なるのはその内部に大量の放射性物質を保有するので、放射性物質が漏れ出し、環境の汚染を惹き起こす恐れがある。そこで目標は単純で、原子炉容器はもちろん、その他の機器、配管が健全で、漏洩を起こさないことが第一である。しかしながら、軽水型発電炉の1次系の温度と圧力は高く、しかも強い放射線に曝されるため材料が劣化する。また、核燃料サイクル施設の中には強酸の環境もあり、それによる材料の腐食の問題もある。バックエンドの高レベル放射性廃棄物はガラス固化されるが、非常に



長い年月が経過するとガラス固化体のまわりに設置されるオーバーバックおよびガラス固化体そのものもやがて破損する。核融合炉では真空壁の照射損傷とブランケット構造材料の問題がある。すなわち、原子力の安全性に係る最も大きな課題は材料にあるといえよう。したがって原子炉燃料を含む材料の研究は今後とも原子力学にとって重要な柱である。ここで、従来は協力が十分でなかった産学官が今後は力を合わせて研究を進めることも必要であろう。

- (4) 原子力施設の安全性を向上し、信頼性を向上するためのソフト面での大きな課題として二つある。その一つは安全を重視した経営であり、安全管理を目指した運営体制の構築である。しかも経済性の向上という切実な要求に対し、いかに安全性を担保するかが今後さらに重要となろう。これに関連して、安全規制の在り方も問題であり、合理的でかつ有効な安全規制体制も今後重要な課題であろう。もう一つは、いわゆるヒューマンファクタに伴うことである。原子力発電所では今なおヒューマンファクタに基づくと考えられるトラブルが後をたたない。したがって、人間信頼性解析の高度化や機器やその操作に対する人間行動の支援技術の研究開発が重要である。それとともに、安全性に関する教育、訓練をいかに効果的に実施するかも重要な課題であろう。併せて、関連する技術の伝承も重要である。
- (5) 今後の原子力施設の安全性と信頼性の向上を目指すにつけ、リスクの解析を高度化し、安全目標を設定することが望まれる。社会的には限りなく安全であることが望ましく、絶対に安全で放射性物質の漏洩がゼロであるに越したことはないが、これまでの事故やトラブルからして、また工業システム全体を通じてそのようなものはあり得ない。したがって、安全目標の設定について十分に議論するとともに合理的な手法で精度よくリスクを評価する方法を開発する必要がある。その上で、原子力施設のリスクについて、運転や保全に生かすとともに、さらに進んで社会にも説明していけるよう努力すべきであり、ここにも原子力学のフロンティアが存在する。
- (6) 従来、原子力の安全性と信頼性向上のための研究は幅広く進められ、成果は非常に役立ってきたが、なお産業界、公的研究機関と大学の間の協力やシステムティックな調整は不十分で、能率的でなかったり、必要な研究が後に回されていることも見受けられる。原子力の安全研究に対するニーズを調査しその実施計画を総合的に行うことが必要であり、またそうした安全研究における競争的資金の導入も考慮すべきである。今後、日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新法人は、原子力の安全研究をリードするとともに、産業界や大学との連携と協力を図ることが望まれる。
- (7) わが国は、国際原子力機関（IAEA）その他を通じて原子力の安全性と信頼性の向上について国際的な活動を進め、国際協力も幅広く行っている。今後ともこうした活動を積極的に進めるべきである。

### 3) 新型の原子炉システムの開発

わが国では軽水型発電炉として、加圧水型炉（PWR）と沸騰水型炉（BWR）があるが、いずれも1基当たりの設備容量が増大し、最近の改良型のもの（APWRとABWR）では電気出力150万kWに近づいている。このような大型炉はスケールメリットにより経済性が向上するが、最初の設備投資が非常に大きくなる。また、このような軽水型発電炉でも熱効率が30%台しかなく、最近の天然ガスタービン発電に比べると10%以上低い。さらに、大型炉では受動的な安全設備の取り付けなど容易ではない。こうした点に鑑み、世界的にも中小型炉の開発が注目され、その基礎研究が始まっている。その特徴を列記すると以下ようになる。

- (1) 受動的（静的）安全設備の取り付けが容易
- (2) 高温ガス、液体金属、超臨界圧軽水等の採用による高い熱効率
- (3) 原子炉ユニットの規格化、制御システムの簡素化、内蔵化等による耐震性の向上、経済性の改善
- (4) 運転サイクル長の延長、核燃料セキュリティの改良
- (5) 水素を製造し、供給する可能性
- (6) トリウム燃料サイクル導入の可能性
- (7) 開発途上国等における安全性の高い小型炉として配置が可能

こうしたことにより、核エネルギーの利用を目指す原子力学における新しい課題としてその開発基礎研究が位置付けできる。しかしながら、50基以上の軽水型発電炉により3分の1以上の電力量を生産し、使用済燃料の再処理からバックエンドの確立が多難ながらも進んでいるところへ、新たにこうした原子炉や燃料サイクルの導入を目指せば、多くの問題を新しく生み出す可能性もある。そこで早い段階から、原子炉本体の安全性のみならず、その燃料サイクルやバックエンド対策ならびに経済性について厳しい検討を加えておくべきであろう。

現在、米国エネルギー省（DOE）が中心になって30年先に運転開始できる新しい原子力システムを支援する上で必要な研究開発ロードマップをまとめるための第4世代と称する国際協力活動がスタートしている。わが国でも原子力委員会に革新炉検討会が設置されており、研究開発の機は熟しつつある。これについても日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新法人がリードし、大学や産業界と協力し、また米国等とも連携して研究を展開することが望まれる。

### 4) 核燃料サイクルとバックエンドの確立

高速増殖炉サイクルの開発およびプルトニウムを軽水型発電炉で徐々に燃焼するいわゆるプルサーマルの実施は、現在多くの問題をかかえ実行が足踏みしている。しかしながら、核エネルギーの有効利用のためには燃料リサイクルが欠かせないことから、安全技術の確保を最重点課題として着実に進める必要がある。まず第1に、青森県六ヶ所村で建設中の商業用再処理工場および計画中のMOX燃料製造工場の安定で安全な操業を行うことが重要である。これらに関して、大型プラントの運転



管理や発生する放射性廃棄物の処理技術などに関しての研究が引き続き求められている。

高速炉サイクルについては、経済性、安全性に優れた高速炉システムおよび燃料サイクル（燃料製造、再処理）に関し、高速炉「もんじゅ」の有効利用を含めて十分に検討することが必要である。また、エネルギー源の多様化の観点からは、トリウムの利用も視野に入れておく必要がある。

放射性廃棄物処分において今後の重要な課題は、高レベル放射性廃棄物、TRU（超ウラン核種）廃棄物、ウラン廃棄物、一般の放射性同位体・研究所廃棄物の処理と処分に関わるものである。原子力施設より発生する放射性廃棄物について、含まれる放射性核種の種類、濃度に応じた適切な処理処分方策が国レベルで検討されてきた。また、原子力発電所より発生する低レベル放射性廃棄物の均質固化体、雑固化体はすでに青森県六ヶ所村にて浅地中処分が行われている。高レベル放射性廃棄物の処分は今後事業主体によるサイト選定作業が開始されるが、これと併行して、処分性能を高め、放射性核種の環境挙動に関する基礎的研究等安全評価精度を向上させるための研究を推進することが必須である。ウラン廃棄物については、有効な除染方法の研究と、娘核種ラドンの地中挙動に関する研究が重要である。また、一般放射性同位体・研究所廃棄物の処理処分やクリアランスの実施については、放射性廃棄物の分別を効率的に行うための測定手法に関する研究開発が重要である。

使用済燃料中に含まれるマイナーアクチニドや長寿命核分裂生成物を分離しそれを原子炉や加速器等で照射して短半減期核種や安定核種に変換する、分離・核変換技術は、環境負荷をより低減する将来の技術として注目されている。これらに関する基礎的研究を、分離・核変換を行わない場合との環境負荷、経済性における違いや技術的可能性について留意しつつ開発を進めることも求められている。

必要な基礎的研究を大学独自で行うことにはおのずから限界がある。そこで日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新法人が中心となり、大学との適切な連携のもとで行うことが必要であろう。

## 5) 放射性物質による環境汚染の防止と回復

チェルノブイリ原子力発電所での事故や、アメリカ、旧ソ連における核兵器開発に伴う放射性物質による環境汚染の例に学ぶと、ひとたび環境汚染が生じるとその修復は容易でない。したがって、まずは放射性物質による環境汚染の防止が重要である。このような観点から、今期の日本学術会議では、荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会に放射性物質による環境の汚染防止と回復研究促進小委員会が設置され、ここで核エネルギーと放射線の利用に伴う放射性物質による環境汚染の防止、ならびに、すでに、核実験、核兵器開発、原子力施設の事故等で発生した環境汚染の回復に関する研究開発を促進するため、それらに関する要素技術、システム技術、モニター技術等についての調査、検討を行っている。とくに放射性物質による環境汚染の防止とその回復については、①放射性物質の環境漏洩ないし

その徴候の事前検出のため、測定機器と漏洩徴候を診断するシステム技術等、先進的計測技術の研究開発が必要であることに加え、②放射性物質の分別、処理、処分、分離・核変換が、放射性物質による環境汚染を低減ないし防止する役割があることから、革新的な除染方法の研究開発、新しい核種分離・核変換の技術、システムとその基盤となるデータベースの整備が求められる。

## 6) 核融合炉の開発

国際熱核融合実験炉（ITER）については、国内誘致を視野に政府間協議に臨むことが適当であるとした総合科学技術会議決定や、青森県六ヶ所村を国内候補地として政府間協議に臨むことを了解するという閣議了解など、最近、新たな段階に入っている。また、原型炉や商用炉の開発に向けての研究も大学や日本原子力研究所等で行われている。このような核融合炉工学研究をITER計画との関係を含めてどのように考えるのが適切であるかの議論が様々なレベルで行われている。

第17期日本学術会議核科学総合研究連絡委員会核融合専門委員会では、長期的かつ幅広い観点から先導的に着手する必要があるいくつかの分野を取りあげて検討を行った。とくに、核融合炉早期実現のための技術的課題を新たな視点から整理して、大学等において重点的に進めるべき材料システムを中心とした核融合総合工学の在り方を明らかにし、今後の研究推進体制について具体的提言をとりまとめている。これは「核融合工学の再構築と体系化について」と題する対外報告にまとめられ、公表されている。

そののち、中央省庁が統合されたことに加え、ITER計画が新たな段階を迎えようとしていることを考慮すると、全日本的な視野に立って、核融合エネルギーの制御と利用の実現に向けての研究開発のあるべき姿を、核融合炉心プラズマ研究ならびに核融合炉工学研究の双方の側面から検討することがより重要となっている。このような観点から、第18期日本学術会議核科学総合研究委員会核融合専門委員会では、平成14年11月「核融合研究の新しいあり方」という対外報告を発表している。その報告書では、（1）責任路線の確定と中核的課題の遂行、（2）他路線の位置付け、（3）目指すべき体制の変革、（4）民間評価グループの自律的形成の4つを提言している。（1）では、「プラント規模での発電実証を早期に実現するためにトカマク方式を責任路線と確定し、ITERの推進とほぼ並行して、4つの重要課題すなわち、①強力中性子源を活用した材料開発、②ブランケット総合工学の構築、③高ベータ定常運転などトカマク高性能炉心プラズマ開発、④システム統合化技術の開発を重点的に取り上げ、予算措置はもとより人的配置も含めて強力に推進すべきであると述べ、核融合開発を基盤的に支える研究との連携が重要であるのは言を待たないとも記述している。原子力学としても重要な柱の一つとして、核融合炉開発の基礎となる研究に積極的に取り組むべきである。

#### 4. ミクロ世界にシーズを探索する原子力学

##### 1) 加速器とビーム工学の展開

原子力学の重要な分野として、エネルギー利用の面と共にいわゆる放射線の様々な分野への展開がある。放射線の経済効果に関する指標の調査結果で示されているように、これまでの受け止められ方以上に社会に果たす役割ははなはだ大きい。たとえば、イオン注入技術は半導体デバイス作成の基本技術として情報産業を支えている。電子ビームによる架橋反応は自動車のタイヤの強靱化をもたらし、車社会における安全性に大きく貢献している。病気の診断や治療における放射線や加速器ビームの利用もきわめて多く、人間の基本である生命・健康維持に必須の基盤技術となっている。放射線発生技術と利用の高度化の結果、加速器で得られるビームは量子ビームという言葉で呼ばれることも多い。量子ビームの「観る」、「創る」、「治す」という機能は、新材料開発などの理工学分野以外にも、情報科学、環境科学、生物・医学、人文・社会科学など様々な専門科学分野に深く浸透するとともに、産業界や医療機関において大きな役割を果たし、広く、今日の社会に貢献をしているといえる。さらに、21世紀における工学は、前世紀後半において果たしてきた豊かさや利便性の追求という工学のパラダイムを乗り越え、環境とバランスする新技術の開発や応用のブレークスルーとなり得る基礎基盤研究に重心を移すことが求められている。このような観点からも、加速器や量子ビームは、工学が目指す新しいパラダイムの中で重要な役割を担う是非とも必要な基盤技術要素となっている。

上述の産業応用や医療診断・治療応用は、物質透過、放射線誘起反応、物質輸送、放射線効果・損傷など放射線と物質との相互作用に関する地道な基礎研究の末に実用化したように、今後ともビームと物質との相互作用について新しい機能とプロセスを引き出す研究が求められている。また、ナノデザインを目指した基礎研究の果たす役割も大きいと期待され、ビーム発生装置面での革新的展開がとくに望まれる。大学等に設置されている原子力関連の加速器施設は、独自の発想に基づいた萌芽的・革新的研究開発、学生の教育および加速器研究開発分野への人材養成に大きく貢献してきたが、設置後10年以上経過したものが多い。上に述べた大学等における研究をより活性化し、世界における日本の貢献度を維持向上させるために、抜本的な新鋭化が強く望まれる。一方、日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構の加速器統合計画を始めとする大型プロジェクトは最先端研究の実施に重要な役割を果たすものと期待される。

わが国における加速器施設の現状について、日本学術会議核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会でも調査しているように、大型プロジェクトや大学における中小型加速器以外にも、学際的利用や地域の産業の高度化を目的とする加速器および計画中の加速器駆動型原子炉も原子力学の新しい分野を拓くことが期待される。

##### 2) 試験研究用原子炉の利用

試験研究用原子炉は、①中性子源および教育訓練用原子炉、②新型炉の研究と特定問題の探求を目的とする原子炉および③臨界集合体に大別される。わが国の運転中の試験研究用炉および研究開発段階にある原子炉施設一覧を表3に、運転中の臨界実験装置一覧を表4に示す。

中性子源（ビーム、照射、放射性同位体製造、生物・医療）用原子炉では、中性子が様々な分野の基礎・応用研究あるいは産業・医療に利用されている。たとえば、微量元素の放射化分析、中性子の転換注入（NTD）による半導体の改質、悪性腫瘍のボロン中性子捕捉療法（BNCT）、生体高分子なども対象とした構造解析、物質の磁気構造解析、結晶構造（中性子回折）、軽元素の可視化（中性子ラジオグラフィ）さらには、3次元画像解析や動画撮影技術（中性子テレビジョン）などへの応用研究が盛んになされている。

また、大学の研究用原子炉は臨界集合体を含めて、同時に教育訓練炉としての機能をも果たしており、後述するように実地教育訓練に果たす役割は大きい。

一方、臨界集合体、実験炉、原型炉、安全性研究炉等新型炉の研究と結びつく原子炉が、わが国には現在、13基（うち臨界集合体は6基）ある。これらは、小型の模擬炉心から出発し、諸々の技術課題を順次、段階を踏んで着実に解決して、安全かつ優れた特性をもつ実用炉を開発するため、あるいは基礎研究のインフラストラクチャーとして、不可欠である。しかしながら、これらの設備は現在、次のような大きな問題に直面している。

（1）一般の原子炉と同様、試験研究用原子炉にもバックエンド問題、すなわち使用済燃料の問題と放射性廃棄物の処理処分問題がある。これは経費の問題にとどまらず、法的・外交的な措置とも密接に関連するため、一大学、一研究機関等で解決することは不可能である。現在検討が進められている日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構を統合した新法人との関わりなども含めて、国として早急に解決への道筋をつけることが必要である。

（2）試験研究用原子炉は、その維持管理に多大な費用を要し、かつ、近年、立地地域住民の対応が厳しくなっていることから、存続が困難になってきている例が多いが、学術研究のみならず実用化研究においても大学における教育研究との関連で果たす役割は大きく、社会的資産としてその特質に応じた活用の方策を図るべきである。

### 3）放射性同位体の新しい利用

放射線利用は、X線の発見後直ちに始まり、医学、農学、理工学、工業利用などが発展してきた。放射線利用統計（図2）によれば、放射線利用は1970年代に急激に増加した後増加が緩やかになっている。このことから、加速器の発展により、放射性同位体は、放射線利用におけるその役割の一部を量子ビームに委ねることになり、可搬性やトレーサーとしての利用など量子ビームとは異なった特徴を活かした利用に供されていることが窺える。とくに、加速器の発展により、短寿命陽電子

放出核種の利用が比較的容易になったことに加え、放射線検出器やデータ処理技術の進展により、放射性同位体の利用に新しい展開が生じている。その顕著な例が医療、生物学、農学分野におけるポジトロン・フォトンイメージング（PET、SPECT）や、材料科学における陽電子と物質との相互作用に基づく陽電子計測手法である。

これらの分野を一層発展させるためには、ミクロな領域での放射線と物質の相互作用に関する基礎的研究と、高感度・高速放射線検出システムの開発、線源生成・調整・供給法の研究、線量評価（とくに微細な領域の線量評価）などの応用的工学的研究等が必要である。医療・医学分野においては、医学物理学士の必要性が認識されており、原子力学はこの分野に研究のシーズを探るとともに人材養成に貢献することが必要と考える。

放射線の特徴は、エネルギー当たりの効果が大きいこと、検出効率が高く微量の検出が可能であることであろう。この特徴は、21世紀の環境と調和した技術の概念に沿うものである。この新展開が、環境浄化、放射線育種、食品照射、トレーサーとしての利用などとともに一層発展し、さらには新産業の創出につながることを期待される。安全を担保した上での利用促進のために、PETについては、第17期日本学術会議核科学総合研究連絡委員会原子力基礎専門委員会報告が実情調査と放射線障害防止法関連の法令の見直しや一元化等の提言を行っている。

#### 4) 同位体理工学の可能性

同位体は放射性同位体と安定同位体に分けられるが、安定同位体も今後は一つの科学技術分野を形成する可能性を持つものとして注目される。ここでは安定同位体についてその特徴、学術、研究開発の状況を述べる。

同位体は、その核反応特性が大きく異なることから、軽水炉における $^{235}\text{U}$ 、重水炉における重水素など、原子力の実用化には同位体分離技術の確立が不可欠であった。ウラン濃縮については、ガス拡散法と遠心分離法などが世界的に商業化している。米国、フランスがガス拡散法、ロシア、英国、オランダ、ドイツ、日本が遠心分離法を採用している。日本ではその他、レーザ原子法・分子法、化学交換法の研究開発も行われ、技術的には成功している。すでに商業化している遠心分離法については高効率を目指した遠心分離機の開発が今も続いている。

原子力から始まった同位体分離技術は現在天然元素一般へと対象を広げている。たとえば、質量数の違いによる化学反応速度や平衡定数のわずかな差異を利用した化学交換法が軽い元素に適用され、水素、リチウム、炭素、窒素、酸素などの同位体分離が可能となっている。硝酸と酸化窒素ガス間の窒素同位体分別効果に基づく $^{15}\text{N}$ 濃縮法を日本では理化学研究所が開発し、現在民間で企業化され、生産された $^{15}\text{N}$ の輸出も行われている。日本では近年液化天然ガスの低温蒸留法による炭素同位体 $^{13}\text{C}$ 濃縮法が開発された。また化学交換法によるホウ素同位体 $^{10}\text{B}$ 濃縮も民間企業によって実用化された。一般元素の同位体分離は大学内で行っている学術的研究

表3 運転中の試験研究用炉及び研究開発段階にある原子炉施設一覧表

(平成14年2月末現在)

	設 置 者 名	名 称	所 在 地	炉 型	熱出力 (電気出力)	運転開始年月	大 学 等 共 同 利 用
運 転 中	日本原子力研究所	JRR-3 00	茨城県那珂郡東海村	低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型	20MW	平成2年3月	東京大学原子力研究総合センターが窓口で実施
		JRR-4 NSRR (原子炉安全性研究炉)	〃 〃 〃	濃縮ウラン軽水減速冷却スイミングプール型 濃縮ウラン水素化ジルコニウム燃料軽水減速冷却非均質型 (スイミングプール内環炉心、定出力・パルス両用炉)	3.5MW 定出力時 300kW パルス運転時 23,000MW	昭和40年1月 昭和50年6月	同上
		JNTR (材料試験炉)	茨城県東茨城郡大洗町	濃縮ウラン軽水減速冷却タンク型	50MW	昭和43年3月	東北大学金属材料研究所 JNTR 利用施設が窓口で実施
		HTTR (高温工学試験炉)	〃 〃 〃	低濃縮二酸化ウラン被覆粒子燃料黒鉛減速ヘリウムガス冷却型	30MW	平成10年11月	-----
	核燃料サイクル開発機構	高速実験炉 「常陽」	茨城県東茨城郡大洗町	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料 ナトリウム冷却高速中性子炉	MR-1 炉心 75MW MR-0 炉心 100MW MR-III 炉心 140MW	昭和53年10月 昭和58年3月 ---	東北大学金属材料研究所 JNTR 利用施設が窓口で試料照射
		新型転換炉 「ふげん」	福井県敦賀市明持町	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料 重水減速沸騰軽水冷却型	557MW (165MWe)	昭和54年3月	-----
	立教学院	立教炉	神奈川県横浜須賀市長坂	濃縮ウラン水素化ジルコニウム燃料軽水減速冷却非均質型 (TRIGA-D)	100kW	昭和36年12月	東京大学原子力研究総合センターが窓口で実施 (運転を停止、利用も停止)
	近畿大学	近大炉	大阪府東大阪市小若江	濃縮ウラン軽水減速黒鉛反射非均質型	1W	昭和36年11月	大阪大学が窓口で実施
	五島育英会	武蔵工大炉	神奈川県川崎市麻生区 (玉津寺)	濃縮ウラン水素化ジルコニウム燃料軽水減速冷却非均質型 (TRIGA-II)	100kW	昭和38年11月	東京工業大学が窓口で実施 (故障で停止中)
	京都大学	KUR	大阪府泉南郡熊取町	濃縮ウラン軽水減速冷却非均質型	5MW	昭和39年6月	京都大学原子炉実験所共同利用として実施
	東京大学	東京大学原子炉 (弥生)	茨城県那珂郡東海村	濃縮ウラン空気冷却型高速炉	2kW	昭和47年7月	東京大学大学院工学系研究科原子力工学研究施設共同利用として実施
合 計							12 基

平成13年版「原子力安全白書」(原子力安全委員会)を参照し、一部書き換えた。この他に、建設中のものとして、核燃料サイクル開発機構の「もんじゅ」がある。



表4 運転中の臨界実験装置一覧表 \*

(平成14年2月末現在)

	設置者名	名称	所在地	炉型	熱出力 (電気出力)	初臨界年月
運 転 中	日本原子力研究所	TCA (軽水臨界実験装置)	茨城県那珂郡東海村	濃縮ウラン・プルトニウム燃料軽水減速型	200W	昭和37年8月
		PCA (高速炉臨界実験装置)	" " "	濃縮ウラン・プルトニウム燃料水平2分割型	2kW	昭和42年4月
		STACY (定常臨界実験装置)	" " "	ウラン・プルトニウム燃料タンク型(定出力型)	200W	平成7年2月
		TRACY (過渡臨界実験装置)	" " "	ウラン溶液燃料タンク型(定出力・過渡出力両用型)	定出力運転時 10kW 過渡出力運転時 5000W	平成7年12月
	関西芝	KCA (東芝臨界実験装置)	神奈川県川崎市川崎区 (浮島)	低濃縮ウラン軽水減速非均質型	200W	昭和38年12月
	京都大学	KUCA (京都大学臨界実験集合体)	大阪府泉南郡熊取町	濃縮ウラン非均質型(軽水減速及び固体減速)	0.1kW 短時間最大1kW	昭和49年8月
	小 計				6基	

\* 平成13年版「原子力安全白書」(原子力安全委員会)を参照し、一部書き換えた。臨界実験装置とは、原子炉の炉心を模擬した燃料と減速材などの組成と配置で、核分裂連鎖反応を起こす状態(臨界)にすることにより、その炉心の諸特性を求める小形原子炉で、臨界集合体ともいう。研究のほか、学生実験にも用いられる。

がニーズの発生によって、実用化するチャンスがあるものと期待される。

分離技術はまた分析技術と結びついており、相互に影響を及ししながら新しい技術が生まれている。南極氷中の二酸化炭素溶解量と氷の酸素同位体比変動から地球温度の年代による変動が解析され、二酸化炭素の温室効果が確認されるなど、同位体分析技術は地球環境問題の解析にも大きな役割を果たしている。さらに、 $^{13}\text{C}$ でラベルされた診断薬を用いた核磁気共鳴(NMR)分光による胃潰瘍の検診法が開発された。医療用の放射性物質の製造には高濃縮安定同位体が欠かせなくなっている。天然炭素に含まれるわずかの $^{13}\text{C}$ を取除いたダイヤモンドを合成すると、高い熱伝導性が現れるなど、物質材料の面で同位体科学の新たな展開が期待されている。また同位体を使った量子コンピューターなどの概念も提案されてきている。原子力からバイオ、環境、材料、情報など幅広い分野に同位体利用はシフトしており、同位体の理学と工学両面で研究分野が広がりつつある。

## 5. 原子力学研究開発の進め方

### 1) 人文・社会科学との融合、社会との調和

人類にとって、原子力すなわち核エネルギーの発見とその利用は、太古における火の利用に匹敵する大きなエポックであった。しかもわが国は実際に原子爆弾の惨禍を蒙っており、このことはわが国の原子力の平和利用における原点となっている。

こうした原子力の平和利用における基本的視点から始まり、原子力科学技術に対する評価や倫理問題など、原子力学は根源的に人文科学と関連するところがある。また社会における原子力の受容性について考えると、原子力学は様々な形で社会心理学や社会学の研究領域と関わってくる。さらに原子力学は、原子力に関連する政策や法律に関連する研究領域やエネルギーや環境の問題の中で原子力の位置付けを考える経済学の研究領域とも関連がある。

一方、原子力発電の運転や保守の場には不可避免的に現れるヒューマンエラーによる誤確認や誤操作の問題があり、その低減のために人間工学的なヒューマンファクタの研究領域を包含する必要がある。また、運転員や保守員の上部にある管理組織や経営者と安全性の関係が問題にされることが増加している。こうした組織論や集団力学の研究領域も原子力学にとって重要である。

このような原子力に関連する人文・社会科学の研究領域の例を表5に示す。こうした境界領域ないしはハイブリッド的な分野の研究を促進するとともに、またその教育についても配慮することが望ましい。

### 2) 広範な理工学分野との連携協力

理工学分野との連携協力の必要性を3つの観点から述べる。まず第1は、原子力システムの構築の観点から、第2はエネルギー資源や安全面におけるより俯瞰的な観点から、最後はシーズ技術としての観点からである。



表5 原子力に関する人文・社会科学の研究領域の例

基本的視点	<p>人類社会に調和した原子力</p> <p>①原子力の社会的受容に対する社会・行動科学のアプローチ</p> <p>②原子力に関わる意味とコミュニケーション・ギャップ</p> <p>③国際社会における原子力の在り方（核拡散防止に関する国際政治）</p>
従前の研究の充実	<p>理論的研究</p> <p>①原子力など科学技術に関する価値観</p> <p>②原子力など科学技術に関する倫理問題</p> <p>実証的研究</p> <p>①モデル構築を主眼とする研究</p> <p>数値モデル化による社会のエネルギー選定の将来動向予測</p> <p>複雑系処理手法による情報伝達・社会広報メカニズム</p> <p>原子力施設と住民の共生の在り方に関するモデル化</p> <p>初等・中等教育におけるエネルギー・環境教育カリキュラムの開発</p> <p>②測定・調査・データ解析を主眼とする研究</p> <p>(1) 作業・業務に関する研究</p> <p>安全性確保に関わる人の心理・行動特性の解析</p> <p>安全性確保に関わる環境特性の解析</p> <p>(2) 職場の組織に関する研究</p> <p>リーダーシップ、安全文化、安全風土など、安全性確保に関わる職場組織特性の解析</p> <p>(3) 社会に関する研究</p> <p>原子力に関する公衆の意識の実態と動向</p> <p>原子力に関する学校教育・社会教育の実態と動向</p> <p>原子力に関する政策・法律問題</p>
新しい研究の展開	<p>理論的研究</p> <p>原子力に関する人文・社会科学の研究目的の考究（自立的研究目的か、他研究・社会への貢献目的かの考究）</p> <p>実証的研究（モデル構築を含む）</p> <p>①住民参加型地域振興への原子力の寄与の社会システムモデルの構築</p> <p>②資源安全保障からみた燃料サイクルの利害に関する定量的モデルによる評価</p> <p>③核分裂炉から核融合転換への社会・経済面からみたワースト・ベストシナリオの評価研究</p> <p>④原子力の外部性コストの合理的な評価手法の研究</p> <p>⑤原子力PAの評価と改善に関する研究</p> <p>⑥原子力技術者の教育・育成体系と技術の継承システムの構築</p> <p>⑦自由化と原子力の将来についてのワースト・ベストシナリオの構築</p>

原子力工学はもとより原子力発電システムの構築とその健全な運用を中心課題とする工学である。核分裂というミクロな現象を制御し、かつ巨大なシステムを構築する点において、当初は、諸工学のみならず、物理学、地球科学など理学の参画が不可欠であり、また科学者や技術者を惹きつける非常に魅力的なプロジェクトであったため、優れた科学者や技術者が参画し、おのずから広範な理工学分野との連携が保たれた。しかしながら、原子力技術の成熟化に加え、世界的な規模での原子力の社会的受容性の低迷化により、現状ではその参画への魅力が薄れてきたことは否めない。それに加えて、システムの安全面から要素技術がどうしても保守的になり、理工学における最先端技術課題と乖離しつつあるという状況もある。

資源・エネルギー・地球環境における難題が近未来において顕在化するものと予想されるとき、原子力がエネルギーの面で果たすべき役割は非常に大きい。そのためにはシステムそのものに加え、保修の面からの安全性の取組みが重要である。現在の軽水炉技術は工学的システムの観点からは他の技術に比べ遜色のない非常に健全性の高いものであるが、長寿命化を考えると諸工学における最先端技術を取り入れていく努力を着実に進める必要がある。さらに長期的には、3. 2) の安全学・安心学で述べた課題（従来以上に優れた安全の原理に基づく技術の展開、核不拡散の国際問題に対応できるような原子力の技術展開、社会的受容低迷の大きな要因である放射性廃棄物の処理処分における技術課題）の解決に向けて、窓口を広げた連携協力は是非とも必要である。

日本学術会議第17期には、「エネルギー学」の確立を目指して（社会・産業・エネルギー研連）、生物資源とポスト石油時代の産業科学（第6部）、エネルギー研究開発総合戦略の確立について（社会・産業・エネルギー研連）、21世紀を展望したエネルギーに係る研究開発・教育について（社会・産業・エネルギー研連）などエネルギーに関連する報告が数多くなされてきた。また、米国においては「国家エネルギー政策」についての報告もある。これらの報告によれば、100年を超える長期にわたる国際的エネルギー需給の展望なしには、わが国のエネルギーの将来を考えることは不可能であることが分かる。地球環境問題の根幹としてのCO<sub>2</sub>の低減化とともにエネルギー資源の枯渇が重要な因子であり、国内でのエネルギー資源制約からくるエネルギーセキュリティ上からも原子力発電の必要性はきわめて高い。同時にアジア各国におけるエネルギー需要の増大を考慮するとき、産業政策上からも、エネルギー技術上からも原子力発電技術を継承し、さらに必要とする技術を開発することが不可欠である。原子力利用に固有の潜在的危険性に見合った技術力の確保を行うためにも、原子力のエネルギー源としての位置付けを、広範な理工学分野との連携協力のもとで、総合的見地から明確にする必要がある。

また、先に述べたように、安全学の先進分野として、広範な理工学分野との連携協力のもとに、安全学の体系化に寄与する必要がある。

また、放射線の人体に与える影響の観点から放射線生物学や遺伝学の参加も必要

である。その上で、国民への説明責任を果たして社会に安心して受入れられる、あるいは社会に理解されるような放射線影響に関する基礎的萌芽的研究の実施、研究成果全般にわたる体系化ならびに施策への適用のための客観的評価などにおいて、学術としての大学の参加が是非とも必要である。

放射線・量子ビームを活用した技術が一般社会で多角的に展開されており、社会の経済・福祉に果たす役割は非常に大きいにもかかわらず原子力との結びつきについての認識がほとんど無いのが実情である。この面についても広報活動を通じて原子力が果たしている役割を積極的に情報発信するとともに、21世紀における基盤科学技術を担う意味において、広範な理工学分野との連携協力をより強く行う必要がある。

原子力発電所など原子力システムは、巨大、極限環境、ミクロ挙動、高度制御、総合化などの言葉で表現されるように、複層したシステムであり、シミュレーション技術、システム知能デザイン、環境、微粒子、界面など、原子力工学の分野で育った技術体系が多い。これらの技術を、大学での基礎・基盤研究をとおして、積極的に他分野における活用にも道を開くべきであり、原子力学周辺技術の発展の可能性に道を拓くべきであろう。シーズ技術の展開が自由とゆとりと新たな動機を原子力学にもたらし、若い世代に夢を与えることは確実である。

シーズ型研究は多角的拡散的に薄くひろく広がる傾向がある。原子力学が果たす役割は、それぞれの分野と常に深く連携し、物理学分野などで新発見されたメカニズムを工学的観点から応用する新技術や原子力分野での新技術のさらなる展開、個々の専門分野のニーズを汲み上げて課題の解決に努めることなどの複眼的思考のできる学際的人材の育成に努めることなどがあると考えられる。

### 3) 巨大な研究開発機関の役割

わが国における原子力研究の中心的研究機関である日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合して、新たに原子力研究開発を総合的に実施する独立行政法人（新法人）を設置することが閣議決定された。これまで、わが国の原子力研究開発を担って来た、設置目的の異なる主要な研究機関が統合されることは、わが国における原子力研究体制全体に大きく影響するとともに、原子力分野における学術的発展にも少なからざる影響を及ぼすものと考えられる。さらに、両機関の統合は、新法人の役割について、大学を含む国内の原子力研究開発、教育人材育成を俯瞰した広い観点を持って見直す絶好の機会であるとも考えられる。それに関して、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、核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会は「日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構の統合とわが国における原子力研究体制について」対外報告を行い、以下の改善策と提言を示した。

- (1) 新法人の在り方の検討にあたっては、広く大学、産業界等を含む原子力関係者の意見、要望を踏まえること。

- (2) 大学と新法人とは研究の進め方や研究対象が異なっていることに留意しつつ、適切な役割分担と、相互の連携強化が必要である。
- (3) 原子力エネルギーの研究開発について新法人へ期待するところが大きい。原子力エネルギーの基礎基盤研究については大学との連携・協力が重要である。とくに、より強い連携を進めるための拠点の形成を視野に入れた運営が求められる。
- (4) 放射線、加速器利用などの基礎基盤研究について大学と新法人との密接な連携・協力が重要であり、それを強化する運営方式の構築が必要である。
- (5) 大学における原子力研究教育に関して新法人との連携が必要であるとともに、新法人が行う人材育成に対する大学の協力も必要である。
- (6) 新法人の業務に、大学、産業界との連携・協力を掲げることが必要である。また、連携・協力の具体的な進め方については柔軟な対応が可能となるようにすべきである。
- (7) 日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構にある重要な研究施設、設備については国を挙げて維持管理し、有効かつ適切な利用を図ることが必要である。
- (8) 研究炉の使用済燃料、臨界未満実験装置の燃料、実験で使用した核燃料物質の処置、および大学研究機関等で発生した放射性廃棄物の処理処分は大きな問題となっており、国の責任において、これらの処置などについて新法人との関わりを含めて検討すべきである。

#### 4) 大学における研究の在り方

1957年に3大学に大学院原子核(力)工学専攻が開設され、大学における原子力についての教育研究体制の整備がスタートし、徐々に全国に拡大されていった。その後1960年代初頭の、発電炉の導入、試験研究炉の設置とともに、大学における原子力研究は現実的なものとなり、教育・研究ともに順調に進展し、研究面において世界的にも急速に最高水準に到達した。途中、スリーマイル島およびチェルノブイリでの原子力発電所の事故に遭遇したものの、軽水炉あるいは高速炉ならびにバックエンドを含む燃料サイクルに関する研究が活発に行われてきた。しかしながら、ここ10年、軽水炉の成熟化と時を同じくして、また世界規模での原子力開発の退潮とともに、わが国大学の原子力研究の勢いが失せてきたことは事実である。この背景のもと、日本学術会議原子力工学研究連絡委員会、核科学総合研究連絡委員会およびエネルギー・資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会は17期における報告書「21世紀に向けた原子力の研究開発について」において、原子力学においては、原子力学の要素である知見や手法を有機的に整理してつながりを示し、全体構成を目指す体系化が不十分であり、今後さらなる研究開発を推進しようとするときは、原子力学が広範な分野の学術複合体であることから、原子力学の体系化がぜひとも必要であるとの考えに達している。この考えのもとに、提言の一つとして、「学問の自由のもと、時代の変化と社会的要請に基づき、原子力学の体系化を推進するため基礎研究の重要性と位置づけを明確にするとともに、大学の原子力研

究を充実させるため、抜本的な改革を実現すること」をまとめている。

一方、1991年の大学審議会答申である大学設置基準の大綱化に伴い、各大学で学部および大学院の改革が実行された。原子力系学科・専攻においても、これまでの原子力エネルギーを主軸とした要素開発型研究から抜け出し、より体系化された学問を目指す方向に研究の軸足を置くべく、各大学で学科と専攻の改組や名称の変更がなされた。この改革において、量子科学などミクロな観点からの学問分野に立脚して、核エネルギーや量子ビームが関わる巨大なあるいは精緻なシステムを構築する学問の体系化を目指すものと共に、原子力を「エネルギー」や「環境」などの枠組みの中にとらえ直す方向、さらに原子力学で生まれた知見や学問手法を様々な分野に拡大して行く方向など、原子力学の領域拡大が図られた。この変化が、大学は原子力から撤退しているとの印象を社会に与えたことは否定できない。しかしながら、この展開は、原子力学が培ってきた固有の学問の深化とともに、底辺を拡大させより広い領域へと原子力学の発展を目指したもので、エネルギーや環境の中で原子力学を俯瞰的にとらえ、原子力エネルギー利用技術の持続的発展を担保するとともに、また逆にその成果をエネルギーや環境にフィードバックすること、さらには最先端科学技術の革新を志向するものであった。

これらはこれまでに培った高いポテンシャルから生み出される学問の自律的な発展に基づく変化であるが、大学の独立法人化のなかで、大学における原子力学が撤退の印象を払拭し社会において信頼を回復するためには、個々の大学が原子力学としての教育研究を行う上での理念と目標を定め、それを実行する必要がある。それなくしては、大学が原子力から撤退しているという社会の評価を解くことはできないし、また、優れた人材の確保も原子力学を発展させる基本的で質の高い研究成果を生み出すこともできない。それと共に、大学は、日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新法人を意識しつつ、産官とのより緊密な連携により、基礎研究の面から原子力学の健全な発展に価値の高い貢献をすることが希求される。

しかしながら、一方において、原子力学の発展におおいに貢献した試験研究炉や臨界実験装置さらには加速器や核融合装置を含めた大型の設備は、今後とも是非とも必要であるが、独立法人化後の大学においてそれら大型設備の維持管理さらには使用済核燃料や放射性廃棄物の処分問題が研究の円滑な進展に支障をきたすことが危惧される。これは学術のみでは解決できない問題であり、国のレベルにおいて早急に解決すべき重要な課題である。

## 5) 産学官の協力の進め方

わが国で原子力平和利用の研究と開発が開始されるさいに、原子力委員会が計画して担当する行政省庁が予算措置等を行い、その傘下の研究機関等が実施するいわゆる国としての研究開発と大学における研究とは一線を画すことが申し合わされた。これは前述のように矢内原原則と呼ばれ、長くわが国の大学における原子力研究の

方針として生きてきた。この原則の背景としては、①国としての原子力研究が大学の自主性になじまないこと、②国の計画推進上必要な大型設備が大学で受入れ難いこと、および③大学が何らかの形で軍事研究に組み込まれる恐れがあったためといわれている。しかしながら、わが国の原子力平和利用が開始後約半世紀を経て定着し、さらに大学における原子力関連の教育研究も自立したため、こうした恐れはほとんどなくなった。その上、これによって大学の研究が枠にはめられ、その後の弾力的な発展が阻害された面もあった。そこで、日本学術会議の第17期対外報告「21世紀に向けた原子力の研究開発について」において、矢内原原則に対する見直しとして言及されている。原子力平和利用の開始に際して日本学術会議が打ち出した基本方針の堅持、原子力の倫理の確立という姿勢を明示した上で、国としての原子力研究開発に大学も積極的に参加するのが適当であろう。また原子力委員会も、大学における研究はもちろん、人材養成のための教育のことについても関与して行くよう改めて行くことが望ましい。

現に、今期の日本学術会議は、従来の立場から脱却して Science for Society の立場を鮮明にし、積極的に産学官の連携にも取り組み始めている。このような動きは、日本学術会議としては革新的な一步を踏み出すものであり、大学の自主性を尊重しつつ、社会の中の大学、社会の中の日本学術会議とすることを意味する。この大きな潮流の中で、また国民合意を形成するために、日本学術会議、日本原子力産業会議等、原子力分野の学術、産業を代表する機関が日本の原子力政策決定に積極的に関与していくことが望ましい。このように原子力学における産学官の協力の在り方を考え直し、今後の発展を図るべき時期である。

#### 6) 地域に根づいた研究開発の可能性

わが国の原子力平和利用が定着し、沖縄電力を除くすべての電力会社（日本原子力発電（株）を含む）が全国各地（12道県、16地点）に原子力発電所を設置し、それらを運転することにより、わが国の電力供給を支えている。また商業規模の再処理施設は現在青森県で建設が進んでいる。しかし、こうした原子力立地地域は、電力の大消費地域から離れているとともに、茨城県東海村を除くと、原子力に関連する産業や研究開発機関は少なく、原子力学の教育と研究を進めている大学もほとんど存在しない。

原子力発電所や再処理施設のある地域に対し、これまで国としていろいろな形で地域振興を図る予算措置が講じられ、さらに最近原子力発電施設等立地地域の振興に関する特別措置法も成立したので、地域振興に対し一層の努力が払われるであろうが、本当の意味で地域に根づいた原子力産業や研究開発機関の本格的な活動はこれからである。

日本学術会議では、1971年に出した「わが国の大学関係原子力研究将来計画」の勧告において、明記はしていないものの、原子力立地地域における研究開発の意義を認識して、地区センターの設置を謳っている。それから30年余を経たが、一



部例外的なものを除き、地区センターは実現していない。これまでの原子力の歴史を振り返り、将来の在り方を考えると、これからでも原子力立地地域の大学に何らかの形で原子力学に関連する研究と教育を進めるセンター等が設置されることが望ましい。このことは、県知事はじめ地域の長も主張し、住民も期待しているところである。

## 7) 国際協力、国際貢献の進め方

原子力学は資源エネルギー供給の安定化、地球環境保全、国際平和の維持、原子炉事故対応といずれをとっても世代を超えた地球規模の問題と直結しており、研究技術のみならず政策面においても海外との連携協力がぜひとも必要である。地球環境を守りつつ、エネルギーを安定的に供給し、世界規模での社会の持続ある発展を目指すことが根幹である。とくに発展途上国においては人口増大が続いており、その生活の安定化に向けては、食糧およびエネルギー供給面での改善がぜひとも必要であり、国際平和につながるものである。日本学術会議の第18期活動計画である、人類的課題解決のための日本の計画に果たす原子力学の役割はきわめて大きい。

エネルギーおよび地球環境面においては、すでに述べたように、米国では現在、エネルギー省(DOE)が中心となって将来世代の原子力発電所の技術や規制に関する基礎を構築する努力を続け、発展途上国においても利用可能な新しい原子力システムとしての「第4世代」(Generation IV)と称する国際的な活動をスタートさせた。わが国においても革新的の中小型炉の開発が開始されたところであり、新しい炉設計概念に大学・研究機関が果たす役割は大きく、国際協調のもとで積極的に貢献し、世界標準炉を提案していくことが望まれる。わが国が原子力の平和利用に徹してきたことに鑑み、とくに核不拡散の観点から核燃料セキュリティに万全を期した設計の面からも大いに貢献すべきである。このことは国際原子力機関(IAEA)や欧州経済協力機構(OECD)を通じて行っているわが国政府の国際活動への積極的な支援にもつながる。

さらに核融合炉の開発についても、これまでのわが国の核融合研究の土台と国際協力の枠組みのなかで国際熱核融合実験炉(ITER)を国内に招致する方針も決まり、最近、新たな段階に入っている。将来のエネルギー安定供給の観点から、長期的に貢献して行くことが必要であろう。

さらに、わが国でおこなっている放射線による品種改良技術などを開発途上国に積極的に技術輸出および技術指導を行い、途上国における食糧の安定供給を支援することが必要であろう。

今後原子力の展開を視野に入れているアジア近隣諸国と地域に対しての技術者、研究者を対象とした国際研修が日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構を中心にして行われている。原子力安全確保・保障措置等は、地球規模での持続ある発展にとって非常に重要であり、また先進国としての責務でもある。ただ、原子力は個別の技術の集積ではなく、それを複合化したシステムであることに留意すべきであ

り、基礎となる物理や化学など総合的な知識の獲得と理解がぜひとも必要である。大学においては、J A B E E等を通じた基本部分の標準化を進め、留学生の受入環境を整備改善するなど、積極的な貢献が望まれる。一方、原子力分野においても国際人を積極的に養成し、国際機関への人的貢献と民間人の起用を推し進めるべきである。

## 6. 原子力学の教育と原子力の人材養成

### 1) 原子力教育への懸念

日本の原子力開発がスタートした時点で、全国の主要な大学に原子核工学または原子力工学の学科（学部）あるいは専攻（大学院）が設置されて教育と研究が始まり、社会に人材を供給した。そのなかから、原子力の研究者、産業技術者、行政官などが育ち、原子力の発展を支えてきた。一方で、最近の大学設置基準の大綱化に伴い、学科と専攻の改組や名称の変更が相次ぎ、大学は原子力から撤退しているとの印象が持たれている。

日本原子力産業会議に設置された「人材問題小委員会」によると、人材確保に関する現状とその主な問題点が以下のようにまとめられている。

- (1) 人材の量的な確保はできているものの優秀な人材の確保が困難となっている。
- (2) 大学では、原子力工学を専攻する学生が減少する傾向にあり、大学における原子力関連の人材教育の地盤低下が顕著であるといわれている。
- (3) 少子化による生産年齢人口の減少の影響を電力は強く受けると思われ、求人等において厳しい状況が予想される。
- (4) 原子力の高度な技術や知識、豊富な経験等を有する技術者が高年齢化しつつあることから、それらのノウハウを若い世代へ確実に伝承していくことが求められている。

さらに、

- (5) 原子力産業を取り巻く環境の変化により、人材の需要が著しく低下している。
- (6) 原子力は社会的にイメージが悪く、若い人への魅力に欠ける。
- (7) 大学の原子力教育研究施設の老朽化が顕著である。
- (8) 2004年度に予定される国立大学の法人化以降、大学における大型設備を必要とする原子力研究教育の位置付けが不透明である。

など、原子力の教育と人材養成に関して、現在あるいは将来予想される問題が幾つか挙げられる。

確かに、人材の需要側と供給側において、需給のアンバランスや質のミスマッチが生じ、また大学や企業側における教育について幾つかの問題点が生じている。原子力関連の技術系採用人員は最近5年間漸減傾向にあり、原子力系専攻出身者が占める割合は平均すると約15%（電気、機械系専攻の出身者が多い）で年40～50名程度になっている。一方、のちに示すように原子力系専攻の博士前期課程の定



員は1学年あたりおおむね270名であるが、狭義の原子力関連の企業、研究機関への就職率は20%に満たず、需給のアンバランスが生じている。また、採用側は狭義の原子力において高度な専門能力を求めているが、原子力系専攻出身者は放射線一般の知識を持つ学生が多く、しかも優秀な人材は狭義の原子力以外の産業へ流れてしまうという質のミスマッチがある。

## 2) 大学における原子力学教育の現状と今後

1991年の大学審議会答申に基づき、各大学で学部および大学院の改革が実行された。学部では、専門科目に替わって工学基礎科目が重視され、専門科目の一部を大学院に移す方向で改革がなされた。この改革において、狭義の原子力は成熟したとの認識に立って原子力の領域拡大が図られた。「エネルギー」、「環境」、「システム」および「安全」などに関連した領域を取り入れ、学科・専攻名称およびカリキュラムの変更を行った大学も多い。表6および表7は、全国の大学における原子力関連学部および大学院研究科（研究所等を含む）の改革前後の状況を示している。一方、国際的に通用する技術者を育成するためのコミュニケーション科目、マネジメント科目あるいは工学倫理を強化するカリキュラムも徐々に取り入れられている。その結果、学部教育において原子力関連の科目が減っているが、工学基礎教育が充実し、大学院の進学率も上昇している。また、大学院においても複数専攻の選択を視野に入れた教育カリキュラムも見られ、大学審議会答申の方向での努力と成果が窺える。「原子力をやりたい」との動機で入学する学生も多いが、大綱化に伴って原子力関連技術者、研究者として自律的に進むための動機付け教育も一方では重要である。

現在各大学は、改革後受入れた学生を順次社会に送り出しているが、同時にさらなる改革も検討あるいは実行されている。今後の改革にあたっては、学部教育における基礎科目の重視だけでなく、現場の知恵や経験を含めた実用技術などに触れる機会を増やす配慮、および自らの専門性を説明できる能力を養うような指導が重要である。また、シーズ型研究および新領域の研究を追求する一方で、原子核エネルギー利用に関する専門家集団としての先導的役割を果たし、堅固な基礎知識と優れた独創性、課題発見や解決能力を備えた原子力技術者および研究者を供給する必要がある。原子力学の新たな展開は、原子力エネルギー利用技術の継続的発展を担保しつつ、学問の自律的な発展を保証するものでなければならない。「大学は原子力から撤退している」との印象を払拭する努力が必要である。

## 3) 研究開発機関における原子力の人材養成

日本原子力研究所における原子力の人材養成については、「原子力に関する研究者および技術者の養成訓練を行うこと」として日本原子力研究所法に定める業務として、設立直後より、「RI研修所」および「原子炉研修所」として、また1996年からは「国際原子力総合技術センター」として業務を拡大し、国内だけでなく、

表6 原子力学の教育を行っている大学の学部の状況

大学	学部	設置時の学科の名称 (設置時期)	現学科の名称 (変更時期)	現学生定員 (1学年)
北海道大学	工学部	原子工学科(昭42)	原子工学科(変更なし)	40
東北大学	工学部	原子核工学科(昭37)	量子エネルギー工学科(平8)	35
筑波大学	工学システム学類	変換工学専攻(昭52)*1	エネルギー工学専攻(平10)	約35
東京大学	工学部	原子力工学科(昭35)	システム創成学科〔環境・エネルギーシステム、シミュレーションおよび生体・情報システムの3コース〕*2(平12)	40
東京商船大学	商船学部	機関学科(昭37)*3	商船システム工学課程〔原子力機関工学科目、原子力システム工学科目〕*2(平2)	35
武蔵工業大学	工学部	エネルギー基礎工学科(平9)	環境エネルギー工学科(平15)	50
東海大学	工学部	応用理学科原子力工学専攻(昭31)	応用理学科〔エネルギー工学専攻〕*2(平13)	60
名古屋大学	工学部	原子核工学科(昭41)	物理工学科〔量子エネルギー工学コース〕*2(平5)	約45
京都大学	工学部	原子核工学科(昭33)	物理工学科〔エネルギー理工学コース原子核工学サブコース〕*2(平6)	20
大阪大学	工学部	原子力工学科(昭37)	電子情報エネルギー工学科〔原子力工学科目〕*2(平8) 〔エネルギー量子工学科目〕(平15)	40
近畿大学	理工学部	原子炉工学科(昭36)	電気電子工学科(平14)〔エネルギー工学コース〕	200
神戸商船大学	商船学部	原子動力学(昭47)	動力システム工学課程〔原子力システム工学講座〕*2(平2)	30
九州大学	工学部	応用原子核工学科(昭42)	エネルギー科学科(平10)	100

\*1: 設置時は基礎工学類

\*2: [ ] は大学科等の中で原子力に重点を置く組織を示し、学生定員は大学科等の数を示す。

\*3: 原子力船工学研究室の設置

表7 原子力学の教育をしている大学の大学院研究科・専攻等と原子力学の研究を進めている大学附置研究所等の状況

大 学	研究科・研究所	設置時の専攻等の名称 (設置時期)	現専攻等の名称 (変更時期)	学生定員(1学年)	
				博士前期	博士後期
北海道大学	工学研究科	原子工学専攻(昭46)	量子エネルギー工学専攻(平8)	21	10
東北大学	工学研究科	原子核工学専攻(昭33)	量子エネルギー工学専攻(平8)	37	17
筑波大学	金属材料研究所附属材料試験炉利用施設(昭44)				
	理工学研究科	理工学専攻構造工学分野(昭53)	理工学研究科構造工学分野	25 <sup>*1</sup>	
	工学研究科	構造工学専攻(昭56)	構造工学専攻(平17.3まで)	12 <sup>*2</sup>	12 <sup>*2</sup>
	システム情報工学研究科	環境エネルギー工学専攻(平12)	環境エネルギー工学専攻 (変更なし)	15 <sup>*3</sup>	15 <sup>*3</sup>
東京大学	工学系研究科	原子力工学専攻(昭39)	システム量子工学専攻(平5)	31	15
	工学系研究科附属原子力工学研究施設(昭42)				
	原子力研究総合センター(昭47)				
東京工業大学	理工学研究科	原子核工学専攻(昭32)	原子核工学専攻(変更なし)	30	7 +若干名
武蔵工業大学	原子炉工学研究所(昭39)				
	工学研究科	原子力工学専攻(昭56)	エネルギー量子工学専攻 (平14)	10	5
立教大学	原子力研究所(昭35)				
東海大学	原子力研究所(昭32)				
名古屋大学	工学研究科	原子力工学専攻(昭31)	応用理学専攻(昭48)	20	4
	工学研究科	原子核工学専攻(昭45)	原子核工学専攻(変更なし)	18	5
京都大学	工学研究科	原子核工学専攻(昭32)	原子核工学専攻(変更なし)	24	9
	エネルギー科学研究科	4専攻 <sup>*4</sup> (平8)	4専攻 <sup>*4</sup> (変更なし)	109 <sup>*5</sup>	49 <sup>*5</sup>
	エネルギー理工学研究所(平8)				
	原子炉実験所(昭38)	原子エネルギー研究所(昭46)			
大阪大学	工学研究科	原子力工学専攻(昭32)	原子力工学専攻(変更なし)	24	10
			電子情報エネルギー工学専攻 電磁エネルギー工学コース(平8)		
近畿大学	産業科学研究所(昭14)				
	総合理工学研究科	物質系工学専攻原子エネルギー 分野(平10)	物質系工学専攻原子エネルギー 分野(変更なし)	50 <sup>*6</sup>	6 <sup>*6</sup>
神戸商船大学	原子力研究所(昭35)				
九州大学	商船学研究科	原子動力学専攻(昭52)	動力システム工学専攻(平2)	11 <sup>*7</sup>	4 <sup>*8</sup>
	工学府	応用原子核工学専攻(昭46)	エネルギー量子工学専攻(平10)	25	12
	総合理工学府	エネルギー変換工学専攻他(昭54)	先端エネルギー理工学専攻(平10)	34	16

\*1: 修士課程のみの研究科、エネルギー関係はその一部 \*2: 博士課程5年一貫、エネルギー関係はその一部

\*3: 博士課程5年一貫、エネルギー関係は1/2

\*4: エネルギー社会・環境科学専攻、エネルギー基礎科学専攻、エネルギー変換化学専攻、エネルギー応用科学専攻

\*5: 原子力関係の学生数は定員の約1/4 \*6: 物質系工学専攻全体として的人数 \*7: 原子力関係の学生数は定員の約1/2

\*8: 海洋機械エネルギー工学専攻に所属、原子力関係の学生数は定員の約1/3

国外の技術者、研究者も対象にして研修を行っている。主たる業務は、「R I・放射線利用に関する技術者養成」、「原子力エネルギーに関する技術者養成」、「原子力関係官公庁・自治体職員の防災研修」、「開発途上国の人材養成等の国際研修」および「一般研修」であり、国内外の原子力の人材養成に大きな役割を果たしている。

一方、将来技術者や研究者となる学生、大学院生の人材養成については、夏季実習生制度など日本原子力研究所の施設を用いた学生実習、日本原子力研究所の研究への学生および大学院生の参加、連携大学院制度による大学院生の教育等の各種制度を整備して対応している。とくに、研究炉、加速器、ホットラボなどの大型研究施設については、その多くを共同利用施設として大学等の利用に供し、大学の教育研究の一部に貢献している。

核燃料サイクル技術の実用化を目指している核燃料サイクル開発機構においては、民間事業者への技術移転に関わる人材養成が一つの重要な役割となっている。そのため、技術移転先の人材を研修員として積極的に受入れ、施設を活用した実地訓練（OJT）を中心とする研修を行っている。

その他、国際的な原子力平和利用推進のため、近隣アジア諸国の原子力に従事する人材の養成も重要な役割である。この一例として、文部科学省の原子力研究交流制度に基づき、中国、韓国、アセアン諸国等9カ国を対象に、原子力施設の安全工学分野、放射線管理分野、保障措置分野などにおける交流を行っている。

また、日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構は防災対応能力強化の一環として、原子力緊急時支援・研修センターにおいて、国、地方自治体等の防災対応関係者を対象に危機管理、防災訓練企画、緊急時広報対応、オフサイトセンター運営等に関する研修を行っている。

日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新法人は、連携大学院制度などをより一層活用するなかで、人材育成面において大学との連携・協力を一層強化し、貢献することが期待されている。今後は、大学との連携の在り方も含め、より効率的な効果ある人材養成の方策を具体的に構築する必要がある。

#### 4) 産業界における原子力の人材養成

前述した日本原子力産業会議の「人材問題小委員会」は、「原子力発電所等原子力施設の保修等の人材育成策」および「産業界、研究機関、大学等における将来の人材確保策」について検討を進めている。

「原子力発電所等原子力施設の保修等の人材育成策」に関する量的問題点としては、①保修に係る人数が原子力施設の規模に比べて多すぎ、実質の作業時間が少ない、②省力化、人材の有効活用を促進するような仕組みになっていない、などが挙げられている。また、質的問題として、①教育成果が蓄積しづらい、②共通の資格制度がない、③電力、メーカー、工事会社などの各セクターが持つべき原子力特有機器の保修技術を明確化し、これらの技術の維持・向上・継承が求められている、

④技術力を持つ地元工事が会社が育ち難い、などが指摘されている。

これらの主要課題に対する対策案として、多能工化や管理の重層化排除による人数削減、状態監視保全方式やオンラインメンテナンスなどによる定期検査時の工重量削減、工事方法の合理化や省力化を促進する仕組みなど、「量の削減策」が検討されている。また、「質の維持・向上策」として、コア技術の維持・向上、豊富な経験やノウハウを有するベテラン技術者から若年層への技術伝承、資格認定制度等を通じた技術の専門化、多機能化も検討されている。

これらの対策については、基本的には個々の企業等の事情等に応じて対応が図られて行くが、とくに、原子力発電所を少数基しか所有していない企業間では、お互いに連携して、量と質の問題解決を図るための「原子力エンジニアリングセンター」構想も検討されている。原子力の開発、利用を今後とも推進して行くためには、前述の「人材育成策」と併せて、レベルの高い原子力技術者や、技能者、作業者を安定的に確保していくための「人材確保策」が求められる。この課題については、大学等の教育機関、研究機関、電力・メーカー・工事を会社を含む産業界等との幅広い連携を視野に入れて検討がなされている。

日本原子力産業会議では諸所の問題点の抜本的な打開策として、関係する各界が協力して、しっかりした人材育成体系を構築することを提案している。この対策として、原子力産業に関わる大学、企業、研究機関等の教育施設、カリキュラム、講師陣などを相互に活用するシステムを通じて、当面ネット上の原子力学校を育てて行くなどの、原子力エンジニアリングスクール構想が提案されている。

産業界は、原子力の活性化に向けて、周辺技術（医療、工業、農業などの分野における放射線利用等）を社会に役立てることを通じ、原子力産業を魅力あるものとして構築していく必要があること、および国民の安心感を醸成するための社会システム構築のため、国は、エネルギー問題における原子力の役割を明確にし、産学官の連携を強化して、学校教育において正しい情報提供を図ること、さらに、原子力利用をより安全に行うことにより社会の理解を得ることの重要性を指摘している。

## 5) 原子力学教育と原子力の人材養成の再構築

原子力教育の社会への責任と、原子力教育が目指す人間像を考える場合、まず「何のための原子力開発か」ということについての認識と使命感の確認が重要である。原子力に携わる人材には、原子力の安全とは何かを理解し、実行するために、放射線、原子核反応、原子炉工学などについての基本的かつ実践的な知識を修得することが求められている。また、産業界が求める人間像は、①原子力の知識を身に付けていること、②ハードに強く、現場感覚を持っていること、③社会性や倫理観を持っていること、④リーダーシップを発揮し、現状を改革して行く力があることにまとめられる。しかしながら、前述のように、需要が年40～50名と少ない状況が続くようであれば、まず狭義の原子力産業を維持・発展して行くために必要な人材の質と数を明確にした上で、全日本レベルの、たとえば「大学横断型原子力工学コ

一ス」を考える必要がある。

一方、原子力系学科・専攻での改組・名称変更は、新分野を拓くことによる優れた人材の確保と原子力学の底辺の拡大により広義の原子力学の発展を目指したものである。このような展開は、社会に信頼される原子力技術の継承ならびに発展への近未来的な対応のみならず、長期的にはノーベル賞を生み出すような教育研究まで広くカバーする原子力学の構築に期待されるものである。加えて、他分野でも活躍できる人材を育てる原子力教育研究、他分野の人による原子力教育研究、「原子力学」の知識を持った社会人の育成なども期待されている。したがって、新しい原子力教育の理念・目的と目標は、「量子科学、エネルギー、環境および資源などの自然科学、ならびに、人文・社会科学の視点から、人類が真に持続・発展可能な条件を予測し、その実現に向けて行動する能力のある人材を育成する」ことにあろう。これらの理念・目的を達成するための目標として、以下のものが考えられる。

- (1) 強い倫理観と広い世界観を持ち、社会に目を開いた国際的人材を育成する。
- (2) 原子力工学、量子科学、エネルギー・環境学などを修得し、これらの専門分野はもちろん、関連する他分野においても柔軟な発想をし、かつ問題解決能力を備えた人材を育成する。
- (3) 人類が持続・発展する条件を予測し、その実現に向けて発言・行動する能力を持ち、もって社会に信頼され、尊敬される人材を育成する。
- (4) (1)～(3)を基礎に、一般社会人のエネルギー・環境に関する理解の向上に向けて、積極的に発言・行動する人材を育成する。

広義の原子力学の分野において、このような理念・目的および目標を達成するために、学術継承者育成、高度職業人育成、専門知識を活かす職業を選択する人材の育成、一般社会人として活躍する人材の育成などに関して、要求される学力を育成対象毎に明確にする必要がある（日本学術会議「教育体系の再構築」特別委員会報告、2002年）、大学の役割はきわめて大きい。広義の原子力学分野を、たとえば「原子力工学」、「量子科学」および「エネルギー・環境学」とし、これらの対象分野とともに、それぞれの教育内容および教育体制などを示す必要がある。

狭義の「原子力工学」に関しては、大学の大学院専攻名称変更などによって狭い原子力教育カリキュラムが希薄化して行くなかで、「大学横断型原子力工学コース」のような基幹となる教育組織を新たに設立する必要がある。大学の原子力教育を行う教育コースを大学と研究機関の連携の下に設置する。各大学から、原子力産業に進む学生を選抜して、この教育コースに送り込む。また研究機関の臨界実験施設、研究用原子炉、R I・核燃料取扱施設、材料試験施設などを使って、一定期間、たとえば3～6ヶ月、集中的に実物に触れる教育を受ける。受入れる学生数は原子力産業界、行政等で必要とする数として、教育に関する数と質のミスマッチをなくする。このような組織を作るためには、多くの解決しなければならない課題があり、まず、先行的特定大学と研究機関による試験的組織を作り、その実績を見て、順次全国に拡大することが最も現実的であろう。このような教育コースでは、産業界と



協力し、産業界から社会人学生を受入れ、原子力教育を行うことも可能である。

#### 6) 教育訓練用実験施設・設備の必要性

大学の原子力研究の場として大学に設置の試験研究炉は大きな役割を果たしてきた。また、試験研究炉や臨界実験装置は、原子力教育における実地体験の重要性に鑑みると、他では代替できない、ぜひとも必要な施設である。さらに、社会における原子力の正しい理解のために、次世代の教育に当たる教員や、原子力に接する機会の乏しい人々に、実際の原子炉に触れる機会を提供することも重要である。しかしながら、文部科学省学術審議会報告「大学における研究用原子炉の在り方について」（2000年）にも述べられているように大学の研究用原子炉は危機的状態にあり、原子力学の学術の健全な進展と人材の育成に大きな影を落としている。国家の施策、矢内原原則等も複雑に絡んでいるため、学術のみでは解決できない問題であり、国のレベルにおいて早急に解決すべき重要な課題である。

現在日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構は統合に向けた取組みが、大学等においては独立法人化に向けた取組みが鋭意なされている。このような情勢の下で、大規模研究設備を必要とし、定常的経費の負担の大きい核融合を含む学術としての原子力学研究は、教育も含めて、その維持がきわめて困難な状況に立ち至ると危惧される。この局面を打開し、産学官の緊密な連携により原子力学の健全な発展が希求される。

#### 7) 原子力学教育と原子力の人材養成による国際貢献

原子力学教育研究および技術の国際協力に関する日本の役割については、とくに今後原子力発電への移行が予想されるアジア地区との国際協力連携が先進国としての責務であるとの意見が多い。そのためには、わが国が真のリーダーとなる分野の見極め、それへの集中がぜひとも必要である。原子力教育については、JABEE等を通じた基本部分の標準化を、学会を中心に進め、アジア諸国における人材養成に貢献する。一方、実地教育としての人材の受入機関となる民間・研究所においては質の確保がぜひとも必要である。

原子力分野においても国際人を積極的に養成し、国際機関への人的貢献と民間人の起用を推し進めるべきである。

#### 8) 初等中学教育および一般教育における原子力学の意義と重要性

原子力の社会的受容性が低い要因として科学技術に対するメディアを含めて人々の理解が不足がちであるとの指摘がある。とくにわが国においては理科教育において、理解度の国際比較は最上位に位置するが、好き嫌いの程度はきわめて低いレベルにあり、諸外国における、成績と好き嫌いとの高い相関とはきわめて異質な状況にある。この状況に加えて、初等・中等教育における原子力・放射線関係の一面的な記述が、日常的理解を超えた科学技術である原子力への無関心を引き起こしてい



ると考えられる。

一方、原子力産業では様々な工学を必要とし、様々なバックグラウンドを有する研究者や技術者が携わる。そのインターフェイスにおいて事故が起こるとの指摘もある。研究者あるいは技術者が原子力産業に携わるさいには、とくに安全面に重点をおいて原子力を総合俯瞰的立場からの教育訓練を実施する必要がある。日本原子力研究所や核燃料サイクル開発機構において、実務研修がなされているが、基礎となる物理、化学および工学の面からの総合的な教育を行うこともぜひ必要であり、社会人教育あるいは生涯教育における大学の果たすべき役割が期待される。

放射線・量子ビームを活用した技術の展開が一般社会で多角的に展開されているが、原子力との結びつきについての認識がほとんど無いのが実情である。この面についても広報活動を通じて積極的に情報を発信する必要がある。現状では、原子力については故障や事故など、負の面のみが強調され、人々の関心を引いていると推察される。学術としての原子力学が果たすべき責務は大きい。

## 7. 提 言

- 1) 原子力学の研究者および関連する技術者は、まずその倫理を弁え、社会のための科学技術であることを改めて認識し、これまでの工学の枠組みを超え、人文・社会科学を含む広い分野の人々と連携や協力を図ることが必要である。
- 2) 資源とエネルギーの安定供給と地球環境の保全、ならびに人類社会の持続ある発展にとって、原子力発電とその核燃料サイクルは今後とも重要であるので、国民に理解される形で内容を公開し、説明責任を果たすことにより、社会的受容性を回復することが第一である。  
その上で、
  - ①原子力の安全性を広く安全学の枠組みの中で強化する。
  - ②放射性物質による環境汚染の予防等の研究を重視する。
  - ③放射性廃棄物の処理処分などバックエンド対策研究に重点を置く。
  - ④将来の原子炉として、革新的原子炉について総合的に研究する。
  - ⑤核融合炉開発の基礎研究も原子力学の重要な柱の一つとして取り組む。
- 3) 加速器や研究用原子炉から得られる量子ビームおよび同位体に関わる基礎研究の推進と広範な分野への展開は、原子力学の重要な一翼として、独創的研究に重点を置いて推進する必要がある。さらに、その成果の中から新しい医療・産業利用などへの萌芽を育て、実用化を図ることも重要である。
- 4) 若者に夢を与え、優れた人材を確保するため、広く開かれた枠組みの中で原子力学の教育と人材養成を再建する必要がある。これにより、高い倫理性と広い視野と開拓精神を持った人材が育てられる。

一方、既存の原子力施設の技術伝承に対する産業界等からの要請に対しては、関係する大学が協力して「大学横断型原子力工学コース」のような教育組織を

設立し、全日本的に対応する必要がある。原子力の開発と利用が盛んな地域の大学に原子力学の教育と研究のセンターを設置することも有益である。

- 5) 原子力の研究・開発において、従来十分でなかった産学官の連携と協力を推進すべきである。とくに日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が統合してできる新独立行政法人と大学は、研究においてはもちろん、教育と人材養成においても、より積極的に協力する必要がある。

## 8. 結 語

日本学術会議原子力工学研究連絡委員会とエネルギー・資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会は、今期の日本学術会議の「人類的課題解決ならびに学術と社会との関係の重視」という二つの方針に沿い、俯瞰的な視点と人文・社会科学との融合や協力の考え方も参考にしながら、原子力平和利用に関わる広い学問分野としての原子力学について、パラダイム転換を含む今後の在り方、広範なその内容、教育と人材養成に関し調査、検討を進めた。検討にさいしては、広く産業界や官庁の人を交えたシンポジウムを開催し、人文・社会科学研究者の協力を仰ぎ、また、これまで原子力関係の学科や専攻がなかった大学の教官を招き意見を聴取した。

さらに、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および核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会は、日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構の統合とわが国における原子力研究体制について検討を行い、結果を提言としてまとめた。関連して、日本学術会議荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会放射性物質による環境の汚染防止と回復研究促進小委員会における検討にも一部参画した。

本報告書は、以上の調査、検討を踏まえてまとめたものである。

「人類社会に調和した原子力学の再構築」

正 誤 表

頁および行	正	誤
10 頁、棒の中、上から 7 行目	ここに制定する。	ここに制する。