

原子力分野における基礎的な研究の
推進に係る調査

本報告書は、科学技術庁から委託を受けた、(社)日本原子力学会の「原子力分野における基礎的な研究の推進に係る調査」特別専門委員会（主査・岩田修一）がその調査結果をとりまとめたものである。

目 次

はじめに

I. 調査研究の目的と概要	1
1. 調査研究の目的	1
2. 調査研究の参加者	1
3. 調査研究の内容	2
II. 調査研究結果	6
1. 原子力技術と関連する基礎的研究に関する調査	6
1.1 引用文献調査	6
<超伝導>	6
<ポリマーの放射線化学(ポリエチレンの橋かけ)について>	8
<二相流と熱伝導>	9
<大型加速器を用いた基礎研究>	10
<計算解析・計算科学>	12
<ポストゲノム生物学>	14
<ピコ秒放射線化学パルスラジオリシス>	15
<分子動力学>	17
<原子力用材料分野における基礎研究>	17
<照射損傷>	19
<中性子散乱>	21
<レーザー核融合>	24
<原子炉物理>	26
1.2 図式化とまとめ	28
1.2.1 I N I S からみた原子力に関わる科学と技術の成り立ち	28
1.2.2 原子力技術の波及効果	41
2. 原子力関連研究の現状と動向に関する調査	43
2.1 科学技術分野の中での原子力の役割	43
2.2 原子力関連科学技術の将来	43
III. まとめ	45
添付資料	
1. I N I S 解析結果(項目別統計、分野間相関)	(1)
2. Standard References についての解析結果	(67)
3. 参照データ	(85)
4. 参考文献	(95)

はじめに

原子力研究が約50年前マンハッタン計画と総称されるCOE群によって開始されたことはよく知られている。それは、大規模な先端科学プロジェクトであり、全く新しい原理に基づくものを計画的に作り出すことが研究開発の目的となり、研究開発というものがいわゆる基礎から始まり応用をへて開発へと至る大イベントとして遂行された。そして、それはアポロ計画、人ゲノム計画など、その後、今世紀の巨大科学技術の難型となった。

当時のCOE群を支えた人々の回顧録(別添参考文献リスト参照)から推察することのできる組織論的特徴は、

- (1) 明確な目標が設定されていたこと
- (2) 強力なリーダーシップが発揮されていたこと
- (3) 基礎から応用に至る広いスペクトルの多分野の才気あふれる研究者、技術者からなる集団が形成されていたこと
- (4) 適切なレベルの研究の自由があったこと
- (5) 十分な予算が用意されていたこと

などである。

敗戦後、ほとんど全科学技術分野のキャッチアップを開始した我が国においては、そうした先端プロジェクト群から生み出された成果の選択と導入・改良が盛んに行われた。最初に学び、現物合わせをし、評価、改良が続いた。そこでは、シーズとニーズを巧みに結び付け市場を獲得することに重点があった。一般論としては、そうした「選択の科学技術」は「独創的な科学技術」との対立の中で劣勢であり、我が国に欠けているものは創造性とブレイクスルーだと強調される。そうなのだろうか？

「科学が発見し、産業が応用し、人間がそれに従う」(1933年シカゴ万博のスローガン)

「人間が提案し、科学が探求し、技術がそれに従う」(D.A.Norman)

という時代の様相の変化を指摘したのは、D.A.Normanである。情報化社会の中で科学技術そのものに普及と急激なダウンサイジングが進みつつあり、世代、分野、地域、価値観、損益などの違いを前提に、社会と科学と技術が今まで以上に相互に複雑に絡み合いながら影響しあう時代になってきた。原子力分野は、そうした科学的、技術的、社会的展開の先行事例である。現在、社会的受容の過程で大きな困難にぶつかり、そのことが才気あふれる人材の供給という点でも大きな障害になっているが、「原子力」を将来の化石燃料の枯渇、予測されるエネルギー危機、環境問題の解決のための科学技術としてだけでとらえるのではなく、後述するように広範な科学技術に支えられた核エネルギー文明の構築という大きな視点でとらえ、社会での共同作業の結果として人類の未来を素描することが大切

であろう。

本報告書作成にあたっては以上の現状認識の下で、文献データベースとして豊富なデータが整備されている1975年以降の20年余りの期間の科学技術研究の研究開発の動向に焦点をあて、今後の基礎研究の在り方について考察してみた。

論点を以下にまとめる。

(1) 「原子力」という主題のもつ困難は、科学技術面だけではなく、経済、社会、政治、文化面でのこみいった、そして未解決のまま積み残された争点をまきこみ、「ロウソクの科学」と「原子力文明」との間の大きな変化の渦として表現されよう。この困難に関しては、社会の中で人々が事実に対してどのように解釈、説明、行動、理解し、“提案”できるかが大切である。

(2) ところが、シカゴパイルから近年の様々なトラブル、事故にいたる半世紀は、世界が、中でも、我が国が急速に活動領域を拡大した時期で、この半世紀に学問領域においても爆発的な膨張・拡大と分岐・進化が起こり、専門化・領域化が進み、科学技術の専門家同士でも分野が異なると真のコミュニケーションが極めて困難になった。

(3) 一方、近年のマスメディアや計算機ネットワークの革命的ともいえる普及は、“表面的”な情報伝達を極めて容易にし、分野間、世代間、国・組織間等の障壁を急速に取り除きつつある。一方、研究インフラについては、グローバルな標準化・均質化が進み、成果の差異性が失われつつある。

(4) その結果、研究テーマに関しては、新しい概念、発想の仕事も、“瞬時”に陳腐化し、「基礎」、「基盤」という言葉でくくるべき“息の長い”研究を継続的に遂行することが困難になりつつある。

(5) どのように優れた研究者にとっても、多様化、複雑化した巨大科学、総合科学の本質を見抜き、方向づけることは容易ではない。研究計画/評価においても、ともすれば、既に出来あがってしまった概念、“耳触りのよい”キャッチコピーを採用し、無難な評価を与えることが多いのは否めない事実であろう。このことがキャッチアップが容易であり、革新的な、来世紀を拓くようなイノベーティブな研究を育てることが困難な理由であろう。あたりまえのことだが、ほとんど全てのブレークスルーや変革は、トップダウンで計画したように進むものではなく、“現場の小さな疑問や創意の深掘り”と“トップ”の理解が融合して発展するものである。

本報告書では、専門分野を異にする各委員が、以上の認識の下に、それぞれの専門分野についての総括と反省を行い、今後の研究体制、研究テーマについての提案を行ったものである。それぞれ所属する研究組織における議論を背景にしたものから個人的見解までの幅があるが、いずれも「原子力」の今後の展開について“苦しみ抜いた結果”の表明である。今後の真摯で生産的な議論と実践への一歩となればと考えている。

1. 調査研究の目的と概要

1. 調査研究の目的

我が国の原子力利用は、その幅広い可能性に着目したニーズの高度化など益々多様化してきている。このような要請に対応するためには、それまでのキャッチアップ型の技術開発を脱し、創造型の開発を推進しなければならない。すなわち、新しい技術体系を構築し、また科学技術全般への波及効果をもたらすため、広範囲の基礎的な研究を推進する必要性が指摘されている。本調査は、この指摘に基づく基盤技術推進専門部会原子力研究推進方策検討ワーキンググループでの基礎的な研究の推進方策の検討に資することを目的とする。

2. 調査研究の参加者

氏名	所属
岩田 修一	東京大学人工物工学研究センター
明石 真言	放射線医学総合研究所放射線障害医療部第1研究室
芦野 俊宏	東京大学人工物工学研究センター
新谷 聖法	動力炉・核燃料開発事業団企画部
上坂 充	東京大学原子力工学研究施設
小山 照夫	学術情報センター研究開発部
数土 幸夫	日本原子力研究所企画室
高橋 智子	日本原子力研究所研究情報部国際情報室
立石 裕	電子技術総合研究所エネキ一部超伝導応用研究室
野田 哲二	金属材料技術研究所第2研究グループ
萩原 幸	日本原子力研究所高崎研究所
馬場 靖憲	東京大学人工物工学研究センター
藤井 保彦	東京大学物性研究所中性子散乱研究施設
堀 浩一	東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
松井 一秋	(財)エネキ-総合工学研究所プロジェクト試験研究部
松本 三和夫	東京大学大学院人文社会系研究科社会学コース
矢野 安重	理化学研究所サイクロトロン研究室

上記委員の他、基盤技術推進専門部会原子力研究推進方策ワーキンググループより、鍛冶幹雄（住友電気工業）、菅原秀明（国立遺伝学研究所）、藤田尚徳（大阪大学）、代谷誠治（京都大学）委員の協力を得た。

3. 調査研究の内容

原子力技術の裾野の拡大をはかるという観点から、キャッチアップ型の技術開発では所与のものであった基礎的知見の集積、キャッチアップ型の技術開発では、省みられなかった新たな可能性を探る研究、原子力技術の推進に必要な調査を行った。

3. 1. 原子力技術と関連する基礎的な研究に関する調査

文献データベースを活用して、現在までの原子力研究及び関連する研究の調査を行い、原子力分野とその周辺の基礎的な研究の流れを分析し、原子力技術の成り立ちあるいは原子力技術の波及効果を調べた。

最初に、1)以下に例示する関連分野の専門家に原子力分野及びその周辺の基礎研究分野の代表的な文献 (Standard Reference; SR) の選択を依頼し、2) 科学技術全分野を対象にして、SR が引用されている文献を SCI データベースを用いて調査し、3)SR とそれを引用している文献との主題分野の相互関係及びその時間的広がりを図式化し、4)SR 毎の調査結果をまとめた。調査対象分野としては、レーザー核融合、計算科学 (第一原理計算、分子動力学)、超伝導、核燃料、中性子・炉物理、RI ビーム加速器、二相流と熱伝達、高分子、生物学などを選定し、代表的文献の例示と1974年から1994年までの期間を対象にして公開後の引用件数を基に研究動向を調査した。

調査にあたっては恣意的な結論を避けるため、一般的な歴史認識、事実あるいは先入観と、個々の統計データの意味について明示的に区別して記載することを試みた。

a) 極めてあたりまえのことであるが、一般的には、誰しもが“break through”と認めるような innovative な仕事は予想外の結果であり、計画的に達成されるものではない。しかしながら巨視的にみれば、そうした“break through”の発生する場では適切なレベルの予算、人員、インフラ、時間と自由が“計画的に”手当てされ、また市場、生存あるいは功名心などをかけた競争や知的好奇心など広い意味での進化の原動力となるインセンティブが存在し、そのことが“核”になる人材の育成や日常的な人の交流と情報の発生を活性化し、そうした環境の中で機が熟すのを待っているかのように偶発的にしかしながらある種の必然性をもって“break through”が達成される。そこでは、“break through”を引き起こすための孵化に必要な時間、組織・体制の整備と維持が必要で、そうした“break through”が引き金となって関連の基礎研究を小波のように活性化し、そうした小波の重なりが科学技術基盤を徐々にかつ着実に変革し、結果的に社会に認知される変化となる。

b) 文献データベースに含意された意味 (semantics) は、そうした小波の統計であり、それは科学技術分野の成果の記録の統計である。本調査では、原子力の広範な分野を対象としている代表的文献データベースである INIS (International Nuclear Information System) を活用して、研究動向の断面を素描したもので、世界各国の原子力分野の情報専門家が原子力分野に関係するものとする文献を予算、マンパワーの許す範囲で収録したものを基礎としている。したがって、他分野の萌芽的な研究を INIS の中で発見することは希であろうこと、また INIS 収録文献の中から他分野も含めた将来の“break through”につながる萌芽的な研究を見つけることも容易でないため、個々の研究の波及効果についての評価、位置づけについては、立場を明らかにした上での整理を必要とする。そのための参考資料として、過去の“break through”に相当する研究成果について SCI を活用した SR の引用データと INIS での収録状況、引用状況についての解釈を添付することにした。

c) 引用件数の統計に関しては、研究分野あるいは個々の研究内容により大きな差異がある。加速器や高温超伝導材料の事例で例示されるように、優れた成果が突然達成され、関連の科学技術者集団の間であつという間に認められて普通名詞化されてしまう研究や、材料の照射損傷の素過程モデリングのように、文字どおり standard reference として長い間引用され続ける文献もある。繰り返しになるが、いずれにしても先駆的な研究成果を生み出す土壌は日常的な基礎研究支援の体制のなかで育成されるものであつた。

d) 今回の調査方法の限界としては次のような問題点がある。例えば加速器技術に関連しては、重要なレポートが内部資料としてだされる場合や、ロシアの論文が勝手に訳出されるなど、Citation Index では調べるのが難しい。また重要な文献ほど、その分野の常識となつてわざわざ引用することはしなくなつたり、SCI はある分野の力学、Scientific Community の形態や常識を表わすので、これらが固定化した際の動向は見やすいが、社会的価値などと外れてしまう。

e) 一方、原子力発電プラントのように大規模かつ複雑な工学システムの実用化には、その完成に至るまでに多大な人、資本、時間の投入と、粘り強く全体を調整してゆくための組織が重要であり、こうした研究開発の実作業や成果を論文数によってのみ計測すべきではなく、創りあげられた人工物の作品としての価値によって評価されるべきである。

また、一人の専門家としての人間が、対象となる人工物に関係したすべてのデータ、知識を掌握することはほとんど不可能であるため、よい作品を作るためには個々の“人間”の不完全性と専門家集団の能力・役割を陽表的に意識して、大規模かつ複雑な工学システムのエンジニアリングを行うことが極めて重

要である。こうした視点をその体系に取り入れた工学の確立が要請されているが、こうした新しい方向に関しては、先端分野にのみ目をむけるのではなく、産業現場、教育現場の生々しいニーズを抽出するしくみが必要となろう。このことは、科学技術政策の立案にあたって、工学的分野と理学的分野とに、視点、方策の違いを明確に意識することが重要であることを示している。

f) INIS が収録する基礎分野の論文は減少傾向にある。理由は明らかではないが、原子力研究から他分野に影響を与えるようなニーズの提示や内容的に他分野と共通な普遍性を指向する研究が少なくなってきたためか、全科学技術分野の領域化の進行によるものであろう。その意味で領域の融合が要請されるようなニーズが、極めて重要であることは論を俟たない。

2. 原子力関連研究の現状と動向する調査

現在、原子力に関連してどのような課題ないしは分野が研究対象として取り組まれているのか、またどのように移り変わりつつあるのかを調査し、多様化するニーズ、原子力利用の潜在的可能性を以下の視点で検討した。

- (1) 利用可能なデータベースを用いて、これまでの原子力研究の横観及び将来の方向性を抽出し評価する。
- (2) 今後の原子力研究のさらなる発展のための研究のガイドライン、体制を提案する。

調査結果から得られた研究開発体制に関する主な結論は、以下の6点である。

- ①イノベーションには継続的な基礎、基盤研究に対する支援とその実用化へのインセンティブが不可欠である。それぞれの学問分野の自律的な発展の中だけでは、分野間の情報交換、さらには個々の成果の普遍化や他分野との接触を介した進展は実現しない。
- ②アイデア段階にある個々の技術的な萌芽の育成のためには小規模でも具体的な開発事例を軸にした実践のしかけが必要である。原子力研究の黎明期は様々な概念、アイデアの模索、検証が重要であったため、分野として他分野の科学技術を牽引する中心的な役割を果たしていたが、近年はそうした事例が減少しつつある。巨大技術においては、一般的に、研究の初期には多くの研究が競合し、理学的実証、工学的実証の過程で厳しい淘汰があり、そうした淘汰過程で研究動向が収束してくる。初期の原子力研究は比較的短期間に収束した希な例であり、その後、市場、安全性、社会的受容、その他の理由で、収束領域近傍の極めて狭い領域に活動が限定されてしまっている傾向がある。
- ③新たな挑戦的技術課題を内包した大規模プロジェクトの実施の過程では副

産物として多くの成果が生み出されることが多い。近年の原子力分野の研究プロジェクトの問題点は、他の先端技術分野の進展速度の急昇に比較して、技術そのものの特徴を反映してソフトウェアが極めて悪いため、他分野の成果の導入に傾斜することが多くなったことである。

- ④異分野の融合は、当然のことであるが、融合が自己目的となるのではなく、具体的な課題を解決する過程で必要に迫られて試みられることが多い。従って異分野の融合が必然的にプロジェクトの完遂と同期する場合は、事例研究としての報告はあっても、事例研究のコレクションを体系化することにはほとんど関心が払われない。
- ⑤移転可能な科学技術体系としてまとめあげるための努力が原子力分野ではほとんど試みられていない。視点を多様化し、そうした“文化”を育てるためには、各分野における過去 50 年の範例－マスターピースと呼べるものを集め、参照できるようにすることも有効であろう。
- ⑥分野別の成果は、近年の研究領域の多様化の中で数多く提示されているが、波及効果としての他分野に浸透するような成果の拡散は十分ではない。INIS という限られた文献データベースでも 170 万件を超える研究開発の成果が報告されており、また科学技術の成果の別の表現である有用な人工物や事故等の失敗例を通じた貴重な教訓も蓄積されている。その中から普遍性のあるものを抽出・体系化し、“原子力”分野における成果として教育研究を通して次世代への継承をはかり、他分野への技術移転の努力を強化する事が重要である。そうした努力の中から新たな人材が育ち、科学技術全体さらには社会に対して大きな貢献をして初めて新たな“核”文明の形成への礎石を築くことができる。

II. 調査研究結果

1. 原子力技術と関連する基礎的な研究に関する調査

1. 1 引用文献調査

文献データベースを活用して、現在までの原子力研究および関連する研究の調査を行い、原子力分野とその周辺の基礎的な研究成果の流れを分析し、原子力技術の成り立ちあるいは、原子力技術の波及効果を調べた。

最初に、(1) 以下に例示する関連分野の専門家に原子力分野及びその周辺の基礎研究分野の代表的な文献 (Standard Reference; SR) の選択を依頼し、(2) 科学技術全分野を対象にして、SR が引用されている文献を SCI データベースを用いて調査し、(3) SR とそれを引用している文献との主題分野の相互関係及びその時間的広がりを図式化し、(4) SR 毎の調査結果をまとめた。調査対象分野としては、レーザー核融合、計算科学 (第一原理計算、分子動力学)、超伝導、核燃料、中性子・炉物理、RI ビーム加速器、二相流と熱伝達、高分子、生物学などを選定し、代表的文献の例示と 1974 年から 1994 年までの期間を対象にして公開後の引用件数を基に研究動向を調査した。以下、それぞれの分野の担当委員から、当該分野の特徴、調査結果についての解釈、コメントを示す。SR および SCI の解析結果については参考資料に別途掲載した。

<超伝導>

超伝導技術の出発点は、1911年の Onnes による水銀における超伝導現象の発見である。しかし、Onnes はまた、引き続いて超伝導性を示すことを見いだした鉛を用いて超伝導マグネットの実験を試みた結果、臨界磁界と臨界電流の存在に気づき、当時の材料では実用にはほど遠いことをも発見した。以後、物理的な現象の解明は別として、工学的な応用としてはめぼしい進展がないまま、約半世紀が経過した。この壁をうち破る動きが 1950 年代から 1960 年代に相次いで起きた。1954 年に Matthias らが、18K の臨界温度をもつ Nb₃Sn を発見すると、高磁界超伝導材料への期待が高まり、1961 年に至って、Kunzler が、8.8T の磁界中でも電流を流し得る Nb₃Sn 線材の製作に成功した。これらの発見と前後して、実用的な高磁界に耐え得る第二種超伝導体が相次いで発見され、それを元に超伝導マグネット技術が開発されて行った。1950 年に発表された Ginzburg-Landau による、いわゆる GL 理論は現象論ではあるが、第二種超伝導体の存在を予言するとともに、その後の基礎理論・技術開発に貢献するところが大きかった。一方マグネットを中心とする高磁界応用とは別に、1961年に Josephson により予言されたジョセフソン効果は、超伝導のデバイス応用への道を開いた。Shapiro による、交流ジョセフソン効果の検証—高周波を印加したジョセフソン接合における階段状の電流電圧特

性、いわゆる Shapiro step 一は、その後これを利用した電圧標準に発展している。Standard References として挙げた3つの論文のSCIの追跡結果は、おおよそ次のように解釈できる。Matthias の論文は、1973年以前はもっと多いものと推定され、 Nb_3Sn が高磁界材料として成熟してゆくにつれ、第一発見までさかのぼる必要が次第に薄れて、引用されなくなってゆき、高温超伝導の発見がこれにとどめを刺している。一方、Ginzburg-Landau の論文は、デバイス・マグネット双方の分野において、応用につながる側面を持つため、コンスタントに引用されつづけていた（ただし、長期的に見ると超伝導研究のある意味での停滞を反映して、右下がりの傾向はある）が、高温超伝導の出現により再び活躍の場が広がり、引用が増大し始めた。酸化物超伝導体は異方性のある第二種超伝導体と考えられているからである。Shapiro の論文も似たような傾向を持つ。酸化物超伝導体が臨界温度の高さゆえに、当初からデバイス応用が有望視されたことを反映していると見ることができる。超伝導と原子力のかかわりは、マグネット技術が主体であるため、加速器と核融合の2分野に限られる。高磁界超伝導の発見により、大空間に定常強磁場を発生することが可能になった時から、加速器はMHD発電とともに、超伝導マグネット技術開発の牽引車の一つであった。（大型超伝導マグネットの製作を可能にしたのは、MHD発電の研究から生まれた完全安定化技術一銅による非常用分路回路の導入一である。）このため、基礎的なレベルから開始された研究も多く、いろいろな先駆的な技術を生み出してきている。1970年代はじめ CERN に設置された水素泡箱用の蓄積エネルギー800MJのマグネットは長く世界最大、かつ定期的に利用され続けた超伝導マグネットであった。また1970年に Rutherford のグループによりシンクロトロンへの適用を目的として、超伝導のパルス的・交流的応用の基礎となる、ツイストされた複合多芯線の技術が開発された。この他にも強制冷却など各種の先進的な技術開発が続けられてきている。加速器では大型のシステムに高い信頼性（長期間にわたる安定な運転）が要求されるため、冷却技術を含めた総合的な技術開発への貢献が大きい。一方、1970年代後半に加速器に遅れて研究が開始された核融合用超伝導マグネット技術の開発では、上記のようなエポックメイキングな原理の誕生こそ見られていないが、LCT計画に代表されるように、既存技術をベースに大幅な技術の底上げが行われ、超伝導技術の裾野を拡大した意義は大きい（超伝導技術は本来汎用的な技術であるため、特定の分野における技術開発の促進は比較的短期間のうちに、他の分野にも転用される傾向が強い）。今日では、SSC計画の頓挫や、ITER計画のスローダウンに代表されるように、いずれの分野においても「大型化」という観点からは厳しい環境にあるが、反面、従来にない技術の開発が求められていることも事実である。核融合においてはトカマク型が研究開発の中心であったため、すでに存在する目標に向けて研究が進められてきた。また、その構造の複雑さゆえ、解決すべき問題が依然多いことも事実である。超伝導技術においても先を見越した技術開発がいずれ求められるであろう。適切な技術予測に基づき、基礎研究を開始しておく必要がある。（立石委員）

<ポリマーの放射線化学（ポリエチレンの橋かけ）について>

ポリマーの放射線化学の発祥は1952年に Charlesby A. によって発表されたポリエチレンの橋かけ反応の発見にあるといえよう。当時は、有機化合物は放射線で分解されやすく、放射線環境で用いる材料としてはあまり期待されていなかった。ともあれ、ポリエチレンのような有機化合物が放射線下でどのような耐性を示すかを原子炉放射線を利用して実験したのが Charlesby であった。彼は、照射ポリエチレンの溶剤に対する溶解性が著しく低下すること、熔融状態での流動性減少、また予期に反して機械的にも強靱になっているなどの特性変化から、照射によってポリマー分子間に橋かけが起こっていると推論し、溶媒への溶解挙動をこまかに解析してこれを立証した。この研究はその後 Charlesby 以外の人々によっても進められた。その結果、放射線照射により橋かけするもの、分解するものを分子構造との関係で経験的に分類することが可能となり、大方のポリマーについて照射効果を経験的に推察することができるようになった。このような結果を含めてポリマーの放射線化学に関する知見を、Charlesby は後に教科書的存在となる単行本 (Atomic Radiation and Polymers, London, Pergamon, 1960) にまとめた。これ以降は、橋かけ反応の発見という Charlesby の業績は「橋かけ」と言うキーワードによって引用されるようになっていく。一方、ポリマーの放射線反応が一般に理解されるようになって、有用な物性変化をもたらす橋かけ反応が工業的に利用されるようになった。現在では、耐熱電線、発泡ポリエチレン、熱収縮チューブその他の橋かけ製品が世界的に普及するに至っている。さて、文献調査の結果は、有名な発見の文献にもかかわらず引用件数が期待したほど多くないというのが第一印象であった。しかし、少し冷静に考えてみると、最初に報告されてから45年を経た今日でも年間平均数件の引用があることに驚くべきであることに気付かされた。放射線橋かけが今日でも研究の対象であり続けていることは事実であり、その第一発見者としての Charlesby の功績の大きさを推し測ることができる。現在もなお、産業的に価値ある新しい応用が継続的に開拓されつつあるところから、Charlesby 論文の引用はこれからも続くと思われる。しかし、次にどんな有用な発見が待ち受けているかを予測することまではできない。ここに S C I の限界があるといえる。Charlesby の発見は彼の serendipity に負うところが大きいですが、基礎研究の在り方と優れた成果がもつ影響の大きさを示す好例といえる。彼は研究対象に当時の新材料であるポリエチレンを選び、実験道具として新装置である原子炉を選んで両者を結び付けた。そして新現象の発見に成功した。ここに実験化学における課題選択の一つのヒントを読み取ることができる。彼は、材料研究という極めて正統的な主題を選びながらも、対象と装置に時代の最先端のものを選んでいく。この成功した基礎研究から、文献調査が研究に役立つ点を拾うとすれば、月並みであるが何が時代の先端かを知り得るところにあると思われる。しかし、文献から得られた知識を次代のブレークスルーに結びつける作業は個々の研究者の独自の発想に依存するところが大きい。最後に、原子力研究におけるポリマーを対象

にした基礎研究の役割について言及すれば、ポリマーは依然として重要な原子力材料としての地位にある。特に今後は核融合炉材料が重要な研究対象になる中で、電線、超伝導磁石、各種コネクタの絶縁材などの用途に耐放射線性ポリマーの開発が求められている。ここでは電磁放射線、電子線に加えて中性子のような重い粒子放射線の影響を明らかにしていく必要がある。特に、イオンビーム、高エネルギー中性子の高線量域での作用の研究は新しく、新規な現象の発見にも繋がる可能性を秘めており、これからの研究領域と考えられる。(萩原委員)

<二相流と熱伝達>

1. 取り上げた標準文献の位置付け

ここで取り上げた以下の3件の論文は、いずれも「二相流と熱伝達」の分野における、特に、沸騰熱伝達の実験と解析に関する基礎的研究である。

(1) Bergles, A. E., Rohsenow, W. M., "The Determination of Forced-Convection Surface Boiling Heat Transfer," Trans. ASME, Ser. C, 86(1964).

(2) Zuber, N., "On the Stability of Boiling Heat Transfer," Trans ASME, 80(1958).

(3) Bromley, L. A., "Heat Transfer in Stable Film Cooling," Chem. Eng. Progr., 50(1950).

沸騰熱伝達の研究は、古くは火力発電のボイラーの設計、比較的最近では軽水炉発電の炉心設計、安全評価のうえで極めて重要な位置を占めており、その他一般産業としても冷凍機、半導体等の電子デバイスの冷却等極めて応用範囲が広い学問領域である。その中で、上記3論文は、沸騰熱伝達の基本メカニズムとして重要な冷却水が伝熱面上で沸騰開始する条件、定常的に伝熱面を冷却しうる極大熱流束、即ち、限界熱流束、冷却水が伝熱面に直接触れられなくなり、伝熱面が非常に高温となる膜沸騰の場合の伝熱特性、即ち、熱伝達率を、それぞれ与える貴重な論文である。

2. 当該分野の研究の流れ

沸騰熱伝達の研究は、従来から、冷凍機、ボイラー等の熱設計、性能向上、事故防止等の観点から、実験解析が各種の構造の伝熱面、種々の使用条件で行われてきたが、軽水炉発電が導入され、又、発電炉の安全性研究が重要視となり、大規模な安全性解析コードの開発、解析コード検証のためのデータベースの構築が益々重要となってきた。これらの要求に応えるため、大規模、かつ、体系的な実験とともに現象の理解、メカニズムの解明のための理論的解析が精力的に進められてきた。これら実験的、理論的解析のベースとなっている研究の成果として、上記の3論文をあげることができる。

3. 分析と評価

参考資料に、1974年から1994年までの上記3論文のSCIによる引用回数の調

査結果を、表で示す。特徴的なことは、Bergles, A.E. and Rohsenow, W.M.の論文が1975年に28回引用された以外は、他の論文も年間ほぼ2ないし8回程度の定常的な引用回数となっている。引用している論文は、機械工学、原子力工学、化学工学、水力工学、電子工学、表面工学、流体工学等の論文であり、極めて広い分野で引用されている。基礎的研究の重要性を伺い知ることができる結果となっている。

Bergles and Rohsenow の論文が1975年に28回と極めて多数回引用された理由は、必ずしも明確ではないが、1975年前後から軽水炉の非常用冷却水の有効性についての工学的安全性研究が盛んになり、その観点から重要な基礎研究の成果として注目されたことが一因と予想される。(数士委員)

<大型加速器を用いた基礎研究>

1. 歴史的背景

加速器は、1930年代初頭に発明され(Standard References、以下SR、「加速器の進歩」(1-3)、原子、原子核、素粒子など自然界の構成要素を探索するツールとして発達してきた。第二次大戦後、研究の対象が原子核からよりミクロな素粒子へと移ると、さらに高い加速エネルギーが必要となり、加速器は高エネルギー化、大型化の一途をたどった。この過程で新しい高性能の加速器を実現するため、様々な技術開発から多くの先端技術が生み出された(SR4-12)。一方、放射性同位元素(RI)の生成に始まった加速器の応用は、はじめ1次粒子線による材料照射・イオン注入などにかぎられていたが、近年になって中性子、中間子などの2次粒子の発生・利用も可能になると、物理、化学、生物、工学、医学など広範な学問分野に広がり、いまや生命科学、材料科学、宇宙科学などの発展にも寄与している。自然科学はこれまで、革新的な測定手法の開発や新しい材料特性の発見で飛躍的に発展してきた。自然界の構成要素を対象とする基礎研究においては、大型加速器はそれ自身が検出器群と一体化して革新的な測定手段の一つになっており、またとくに新しい素粒子や原子核などの創成のためには不可欠な装置である。加速器の高エネルギー化、高性能化によって、自然界の構成要素についての理解が深められてきたことはよく知られている。応用分野では、物質の構造および状態計測、成分分析、材料の合成・分解や物質へのエネルギー注入などの新しい手段として加速器が利用されてきたが、ここでも大型加速器は、X線(放射光)、中性子、中間子や高エネルギー重イオンなど、他の手段では得られない高性能の新ビームを提供できる大きな特長をもっている。これまでは、素粒子・原子核研究のために建設された大型加速器を寄生的(パラサイト)に利用するだけであったが、最近、応用分野に専用の加速器を建設する動きが世界的に高まっている。とくに大型加速器を用いる基礎研究では、(1)エネルギーフロンティア(2)精度フロンティア(3)粒子フロンティアを目指した研究開発で新しい展開を図ることが、21世紀に向けて優れた成果を生み出す重要な戦略になっていると見えよう。優れた成果を生み出すためには、より優れた性能の加速器だけでなく高性能測定装置の開発も同時に

進めなければならない。また最先端の加速器を建設するためにはハード、ソフトの両面で革新的な技術開発が必要になる。

2. 大型加速器の発展と今後の動向

2-1. エネルギーフロンティアにおける加速器の動向

加速器はこれまで高エネルギーの実現を目指して発展してきた。加速方式は直流加速から高周波加速へ変わり、加速器のサイズも整流器型 (SR3)、ヴァンドグラフ (SR3)、サイクロトロン (SR2) から線型加速器 (SR6)、シンクロトロン (SR4、7) へと大型化し、さらには重心系で高エネルギーを得る蓄積・衝突器 (SR8) が開発された。電子加速器の場合には、放射光によるエネルギー損失を避けるため、円型衝突器から直線型衝突器へと高エネルギー化が進められている。加速器が高エネルギー化するにつれて、同時に大量の粒子が発生する現象が観測の対象になってきた。そのため多数の大型検出器を組み合わせ、大量のデータを処理する測定装置が建設されている。最先端の素粒子研究では、加速器と測定装置が一体となって大型化しており、一つの研究テーマに多数の研究者が参加する国際的な協力が日常的に行われている。

2-2. 精度フロンティアにおける加速器の動向

自然科学の研究では、測定精度の向上が新発見をもたらす。加速器による基礎的研究も例外ではないが、加速器の場合、測定精度として加速粒子のエネルギー精度だけでなく、放出される放射線の方向分布計測の精度や時間分解測定の精度を高めることが必要である。また、極めて小さい確率でしか起こらない稀現象を精度よく測定することも必要になる。それには加速エネルギーの揺らぎを小さくすること、加速ビームを細く平行にすること、加速ビームパルスの時間幅を狭くすること、ビーム強度を上げることなどが要求される。このため、蓄積リング、衝突器 (SR8) が発明されたほか、ビーム冷却 (SR9、10) や低エミッタンス化、パルス幅短縮化など加速器の性能を上げる技術開発が行われ、また、ビーム強度を上げるためにそれに伴う不安定性の克服などビーム物理学的研究が進められている。

2-3. 粒子フロンティアの加速器の動向

加速器を利用する研究では、新たな2次発生粒子の実現によっても新しい領域が開拓されてきた。高エネルギー電子、陽子、重イオン加速器で生成される2次粒子 (放射光、陽電子、破砕中性子、中間子・ミュオン、R1など) をビームとして取り出し利用する研究手法が開発され、広い学問分野で利用されている。それぞれが画期的な物質研究の手段になっており、大きな成果を上げている。そのため、専用の大型加速器で大強度の2次粒子ビームを生成して利用する施設が必要になってきている。放射光は高エネルギー電子加速器を発生源としており、短波長の光源として急速に利用分野が拡大している。最近世界で低エミッタンス蓄積リングに挿入光源を設置した高輝度高性能光源が稼働を開始している。放射光の分野では今後、加速器の性能向上によって干渉性の高い光 (X線) の利用が可能になり、物質研究の新し

い手法が開発されると期待されている。高エネルギー陽子による核破砕中性子源は、原子炉よりも強いパルス冷中性子束を発生させることができる。このため、中性子回折による物質構造解析をはじめ、高エネルギー中性子の核反応、放射能消滅など広いエネルギー範囲に亘たる基礎的、応用的研究に用いられている。パイ中間子は崩壊してミュオンになる。ミュオンは寿命が約100万分の2秒で、質量が電子の約200倍重いほかは電子ときわめてよく似た性質をもっている。その特性を生かして μ SR法が開発され、物質研究の新技术として広く用いられるようになった。また、ミュオン触媒核融合も基礎過程の研究が進み、今後の展開が注目されている。最近、重イオン破砕反応で生成される短寿命のRIを単離し高速のビーム(RIビーム)として利用する新しい研究が進められている(SR「RIビームの発生」)。RIビームの出現によって、たとへば宇宙での元素合成の過程や中性子星の構造の実験的研究がはじめて可能になった。また、RIビームを物質や生体内の任意の深さに打ち込む手法を用いた新しい応用研究が、物性・材料・化学・生物などの幅広い分野で可能になってきた。(矢野委員)

<計算解析、計算科学>

Standard Reference としたのは次の2件である。

(1) J.Ihm, A.Zunger, and M.L.Cohen (1979)

"Momentum-space formalism for the total energy of solids"

(2) R.Car and M.Parrinello (1985)

"Unified Approach for Molecular Dynamics and Density-Functional Theory"

両者とも必ずしも原子力に特化したものではないが、計算材料科学分野では非常に基礎的などころで寄与の大きい論文である。原子力においても計算解析や計算材料科学が基盤技術として、あるいは基礎研究分野において重要性を増していることを考えると、本論文のフォローは大きな意味を持つ。

J.Ihm の論文は固体の全エネルギー計算にモーメント空間形式を導入したものである。固体の全エネルギー計算は古くからある問題である。Hartree-Fock 等のシュレディンガー方程式の直接解を求める方法や、その欠点を補い簡略化した電子密度を用いる方法等があり、それによりアルカリ金属等の計算例が報告されているが、分子や半導体分野では大きな誤差を生む。J.Ihm の方法は計算された価電子状態と電子密度から全エネルギーを直接計算する方法である。

入力核の擬ポテンシャルのみであり、調整用パラメータは不要である。広い分野を対象にする基礎的な論文であり、本調査の他の文献に比べて被引用件数は数十件/年とかなり多数であり、しかも毎年安定して引用されている。研究分野・目的も81年頃は結晶構造、電子構造等半導体関連分野、相安定、相転移、熱力学等の基礎的分野が中心であったが、91年頃になると加えて、超電導性、化学反応等のより広い分野あるいは分子動力学等の数学分野にも広がっている。

R.Car の論文は、分子動力学計算は「希ガスに対しては有効だが、共有結合している金属には有効ではない」という欠点があり、密度汎関数理論は「いろいろな化学結合形態に応用できるが、計算量が膨大となり、大きな系の計算が困難」という欠点があるのを解消する手法についてである。すなわち、シミュレーティッド・アニーリング手法に分子動力学計算手法をとり入れたダイナミック・シミュレーティッド・アニーリング法を提案している。本方法により、この分野の大きな問題であった膨大な計算量の問題が大幅に改善された。

本論文は計算科学分野の最近の画期的成果の一つであり、被引用件数は85年の公刊以来急激に増加し、93年頃より200件/年にせまる勢いとなっている。

原子力分野において、計算解析や計算科学は必須不可欠な重要な要素技術の一つである。原子力発電等のエネルギーに関する狭義の原子力分野においては、材料・コンポーネント設計（核燃料、被覆材、壁材、炉心構造材、炉計装材料など）、安全性解析・シミュレーション、炉物理や巨大・複雑なシステムとしての運転・プロセス・処理等に関するシミュレーション、実験不可能な部分に対する理論づけシミュレーション等、幅広い分野で原子力コードとして使われている。より将来的課題としての核融合分野においては、まだ実験データが少なく、プラズマ、高温、高磁場という極限条件を必要とするためシミュレーション計算のはたす役割は大変に大きい。さらにより広義の原子力分野、例えば放射光応用や生物、医療等への応用分野などでも同様に計算解析や計算科学等のシミュレーション技術がおおいに利用されている。

一方、コンピュータ技術の面から見れば、その進歩はすさまじいものがある。1960年代は汎用機の時代、1970年代はスーパーミニコンの時代、1980年代はクライアント・サーバ方式の時代、1990年代はスーパー・パソコンや超並列システムを用いたネットワーク・コンピューティングの時代といえる。この間にハードウェアのコストは劇的に変化しており、現在のスーパー・パソコンを有効利用すれば、汎用機の時代の百分の一、ワークステーション分散型の時代の十分の一のコストで高度なシミュレーションが行なえるようになってきている。ただハードウェアの進歩に対し、ソフトウェアの進歩が追いついていないくらいがあるが、原子力分野については、先に述べたような膨大なソフトウェアの蓄積があり、コンピュータ技術の進歩はそのまま大きな追い風になる。

このように原子力分野での計算解析や計算科学に代表されるコンピュータ応用技術は、原子力そのものの基盤技術や基礎研究の推進の一つの核となる技術である。

また、このコンピュータ応用技術は他の分野と連携することにより、より様々な分野で効果を発揮する共通基盤技術となり得るものであり、原子力分野がこのリーダーシップをとり得るものとなる。例えば巨大技術の波及効果としてのインパクトは、戦争においてオペレーション・リサーチ技術が進歩したこと、宇宙開発においてNASAが果たした役割が様々な分野に大きな影響を与えたこと、軍事におけるコンピューターネットワークが研究・教育、民生においてインターネットとして大きく成長していることと同様のものをも

たらずであろう。

例えば情報科学へのインパクトとしては、巨大システムの制御、複雑系の問題、可視化技術やバーチャル・リアリティ技術、人間系の問題（ヒューマン・インターフェイスや知識の継承など）、遠隔操作技術や遠隔協調作業等のネットワーク応用技術などに近い将来、原子力が具体的に影響しうるであろう。（鍛冶委員）

<ポストゲノム生物学>

(1) ゲノムプロジェクトの始まり

米国においては、原子爆弾を投下した後に、現在の Department of Energy (DOE) の前身である the Atomic Energy Commission and the Energy Research and Development Administration において、放射線影響の視点からヒトゲノムの構造・複製・損傷・修復・突然変異について研究を開始した。その後、ヒトゲノムの全配列こそが当該研究を画期的に進展させる基盤であるという認識が深まり、1986年に DOE としてヒトゲノムプロジェクトを開始した。1986年にはまた、著名な科学者である R. Dulbecco が Science 誌上で「癌研究においてはゲノムの全配列を決定することが有力な戦略である」と主張した記念すべき年であった。こうして、1990年代に DOE のみならず NIH なども含む米国の国家プロジェクトとして、さらには日欧においても国家プロジェクトとして、ヒトゲノムの全配列決定プロジェクトが推進されることになった。

1990年代にはまたヒトゲノムプロジェクトと平行して、

- ・大規模配列決定システムの学習用および検証用として
- ・ヒトに対するモデル生物として
- ・その生物自体の研究のため

多数の微生物および動植物についてゲノムの全配列決定が精力的に進められてきている。

(2) ゲノムプロジェクトの現状

1995年がゲノムプロジェクトにおいて記念すべき年となった。始めて生物の全ゲノム配列が決定されたのである。グラム陰性細菌である *Haemophilus influenzae* と、マイコプラズマの一種である *Mycoplasma genitalium* の全配列が決定されたのである。しかも、当時の予測に反して配列決定に着手してから完成までに要した期間がわずか1年足らずであった。そして、1997年7月の段階では、微生物だけでも50種類近い種についてゲノムプロジェクトが進行している。この中には、生命の起源に関する知見が得られることを期待して好熱菌が取り上げられ、また健康保全と治療に役立てるために病原菌が取り上げられているが、強力な放射線にさらされても機能を回復することができる *Deinococcus radiodurans* という興味深い菌も取り上げられている。

こうした小規模ゲノム配列決定の経験もとりこみながらここ10年足らずの内に、多種多様なライブラリー（出発材料）の調整と管理手法の改良、塩基配列読み取りシステムの

高速化と簡便化、大量かつ複雑なデータの評価・蓄積・表現技術の開発などが画期的に進歩したことによって、ヒトゲノムの全配列も予想より速く2003年には決定されるであろうといわれ始めた。

(3) ゲノムプロジェクトがもたらすもの

ヒトゲノムについては配列決定の競争がまさに熾烈に行われているところであるが、微生物ゲノムについては研究者の間ですでに「ポストゲノム時代に何をなすべきか」という問題意識が高まっている。すなわち、これまでの研究は特定遺伝子を分離してその配列を決定することから始まっていたのに対して、ゲノム配列が決定された生物種については「遺伝子配列ありき」の状態から研究が始まることになったためである。

「配列ありき」の時代、すなわち、動植物および微生物の代表的生物系統のゲノム全配列をデータベースから入手できる時代には例えば次のような研究スタイルが想定される。

a) 分子進化学理論を駆使することによって、生命の起源を追究する。

例えば、始原生物たる遺伝子のミニマムセットをまず推定する。このミニマムセットは当然化学物質であるので、次に化学物質の由来を推定する。さらに、地球環境などを勘案して、いわゆる化学進化の過程を推定する。

b) 比較分子生物学が確立する。

現在でもすでにヒトの疾患と同様の病態を示す疾患モデル動物を開発して、ヒトの疾患の治療に役立てることが行われているが、ゲノム全配列を比較することが可能になるので、分子レベルでの比較生物学が可能になる。

c) 計算機内生物実験が可能になる。

特定の生物内で機能している全ての遺伝子配列が既知になるので、生体内でおきている生命現象を計算機内でシミュレーションすることが可能になる。また、このことによって、生体内(in vivo) や試験管内(in vitro) では実験が不可能な現象を「実験」する事が可能になる。例えば、放射線や電磁波あるいは産業廃棄物や環境汚染が人体に与える影響を長期にわたってシミュレーションすることが可能になる。

こうした計算機内生物実験のためには、ゲノム配列決定の速度に負けずに、大規模データベース、複雑な関係のオブジェクト操作、分散したオブジェクトの操作、高度計算、ビジュアライゼーションなどの関連する要素技術を開発していくことが必要である。

d) 代表的系統のみならずゲノムの全配列決定が日常的に行われるようになる。

特に、薬品業界、種子産業、保険業界などでゲノムの全配列決定が積極的に行われるようになる。このため、配列データを含む生物データについて知的所有権、個人情報保護、さらには生命倫理について深い洞察と社会的合意の用意が必要である。(菅原委員)

<ピコ秒放射線化学パルスラジオリシス>

この研究分野は、電子線線形加速器(ライナック)を用いた放射線化学反応の初期過程

の解明に関するものである。Tagawa,S.の“The Ultra-Fast Process of Picosecond Time-resolved Energy Transfer in Liquid Cyclohexane by Picosecond Single-Pulse Radiolysis”をStandard Reference (SR)としてSCIにより、この研究分野の歴史と原子力研究の中での基礎研究の役割について述べる。Tagawaらは、1977年に、東京大学工学部附属原子力工学研究施設において、S-band (2.856GHz) のライナックを建設し、世界で初めてピコ秒の電子シングルパルスの生成に成功した。同年に反応生成物の発生と減衰を発光パルスラジオリシスによってピコ秒時間領域で測定することに成功した。

上記SRはこの成果に関するものである。この頃同型の実験施設としては、米国アルゴン国立研究所と大阪大学産業科学研究所のL-band (1.428GHz) のライナック、及び南カリフォルニア大学のライナック等が挙げられ、放射線化学の初期かつ基礎過程の研究が鋭って精力的に実施されてきた。また、1982年には反応生成物の発生と吸収を分析光の吸収を調べることによって測定する吸収パルスラジオリシスにも成功した。この時の測定の時間分解能はサブナノ秒であった。以後、パルスラジオリシスは有機化学や物理化学の分野も波及した。さらなる初期過程の解明のニーズはライナックの性能向上をももたらした。Tagawa,S.らは、1984年にはツインライナックシステムを構築した。ここでは、一方のライナックからの電子が空気中で発するチェレンコフ光を分析として使用して、吸収パルスラジオリシスの時間分解能をピコ秒時間領域になるように向上させた。このように、この研究分野は加速器の性能向上にも波及している。

この研究分野は、原子力基礎研究の中では、放射線と物質との相互作用の初期かつ基礎過程という理学的領域をカバーしている。のみならず、原子炉の冷却水の放射線分解に関する工学的研究にも大いに貢献した。原子炉において当初、冷却水の放射線分解によって生成されるイオンやラジカルが、水中の不純物である金属イオンやその化合物イオンと結合し、その生成物が配管の腐食や亀裂を進展させるという問題が生じていた。しかし、水の放射線分解の初期過程が解明されることによって、どのような添加物をどれくらいの濃度で入れれば、配管の腐食や亀裂進展を防げるかが、明らかになった。また、放射性廃棄物の地中保管の際の地下水の放射線分解の研究が行われている。その他の分野では、半導体製造のためのリソグラフィの、レジストの露光過程での放射線化学反応が、時系列に応じて解明され、レジストの高感度化に貢献した。さらに自動車の塗装コーティングの電子線照射による強化の基礎過程も解明された。

現在では、10ピコ秒の電子ビームでやれることはこの20年でかなりやられたこと、世界中のこの種のライナックがどれも稼働20年を過ぎたことなどの理由で、一時の勢いがなくなっている。このことは今回のSCIにおいて、SRの引用件数が1982年頃がピークであったことから読み取れる。しかし最近、ライナックの性能向上させて、フェムト秒の電子ビームを生成し、フェムト秒レーザーと連動させて、フェムト秒パルスラジオリシスを開発しようという新しい研究が立ち上がりつつあり、フェムト秒時間領域の放射

線化学反応の解明への意が開かれようとしている。(上坂委員)

<分子動力学>

この研究分野では1960年に公刊されたGibson, J.B.の論文をSRとしてSCIを行った。分子動力学は、様々な物理現象を分子同志の力学までマイクロ化して解析する手法である。コンピュータの性能向上によって近年多くの科学、工学分野で分子動力学を使用した研究が実施されている。上記SRを引用している文献のほとんどは、金属材料中の放射線照射による点欠陥、原子間原子、カスケード損傷の生成の数値解析に関するものである。また数は少ないが、金属の亀裂進展の数値解析に関するものもある。SCI結果では、SRの引用件数は減少傾向にあるが、分子動力学の分野は確実に拡大している。分子動力学にて解明される現象はフェムト秒・ピコ秒の高速現象であり、実験による測定が困難であるため、力ずくの計算を行っているというのが、現状である。

この研究分野は金属材料の放射線損傷の初期過程という、最も典型的な原子力の基礎研究に端を発している。現在はそこから、熱工学、破壊力学、超伝導工学等、数多くの分野に波及している。原子力の基礎研究が他の分野へ広く波及したよい例であると言える。パルスラジオリシス放射線化学の場合もそうであったが、分子動力学の進展の要因は、現象を第一原理に立ち返って解明しようとする気運である。このとき、対象とする空間はマイクロ化し、時間はフェムト秒の領域に入ってくる。

分子動力学では分子間相互作用を決めるポテンシャルに関して、かなり簡略化された近似を使用している。また、前述したように、現象は高速すぎて、実験的検証もいまだ皆無に等しい。従って、その結果の精度には十分な信頼性があるとは言えない。しかし、最近ではレーザーに続き、電子ビームもフェムト秒化しており、近い将来イオンビームもピコ秒化、フェムト秒化される可能性が強い。これらのフェムト秒ビームとストリークカメラなどの高時間分解能測定装置を駆使して、分子動力学の結果の実験的検証が、期待される場所である。(上坂委員)

<原子力用材料分野における基礎研究>

材料は原子力分野のみならず多くのシステムの基礎・基盤となるものである。

しかし、材料の研究領域自身も、物質から、実際の構造体への応用まで様々な段階で行われている。それぞれの段階では、研究の視点並びに手法も異なってくる。すなわち、量子論に基づいて原子・分子での物質形成の原理の構築と現象の解明等物質を扱う段階から、熱力学的手法が中心となる結晶、純金属、合金、複合材料など材料の段階、さらには構造材料などシステムに直結した場合には、構造力学、統計学など複雑な現象をマクロ的に取り扱う手法により研究が進められる。一般に基礎研究とは、新しい現象の発見や解明、新しい原理や理論の構築、独創的な新技術の創出をもたらすことが期待される研究と定義されている。材料における基礎研究も上記の幅広い領域のなかで、普遍的な原理・原則にも

とづく研究アプローチ、独創的な研究活動に相当すると考えられる。しかし、応用面を重視したより工業規模の材料研究では、普遍的な価値よりもそのシステムに特化される特性が要求される。

材料研究において重要なのは、材料に直接関わるものの他に、新しい材料を作るあるいはその構造を精緻に制御するプロセス技術、原子レベルでの構造解析を可能にする解析技術、第1原理、分子動力学等の計算シミュレーションによる材料設計・解析ならびにモデリング構築のための評価技術である。材料研究の手法の観点からは、これらの要素技術が集まって材料の基礎研究を形成する。

一方、原子力用の材料の研究においては、従来、新型炉等の開発に伴って、その設計要求を満たすよう材料の開発が行われてきた。プロジェクト中心の研究開発で成功した例も多い。軽水炉の燃料被覆管に使われているジルカロイはその例である。また、高温ガス炉の熱交換器材料として開発された Ni 基超耐熱合金が高温ガスタービン材に、また、高速炉用の Cr-Mo 鋼がボイラー耐熱鋼として広く利用されている。しかし、多くの場合、特殊な条件下の特殊な材料として、他分野への波及性が低い、または研究というよりは材料試験的側面が強くデータとしての普遍性に欠ける面があった。

原子力の特有の環境は放射線場である。実際の材料には照射環境下での耐熱、耐食性などを加えた長寿命化が要求される。照射という観点で研究要素を階級化すると、まず照射による材料のマクロ変化は、膨れ、ぜい化、腐食損傷等という形で現れる。結晶レベルでは、各種の転位、ポイド、気泡の成長であり、原子レベルでは、原子空孔、格子間原子発生、さらによりミクロの現象としては電子励起、核反応現象である。

原子力における材料技術で特徴的なのは、放射線利用技術である。材料研究におけるおよそ全てのビーム利用は加速器技術から生まれたものである。軽、重イオン、電子ビーム、レーザー、X線、中性子線などの技術の進展は目覚ましいものがある。

また、一方、計算機の発達は、分子動力学、第1原理計算にもとづく材料損傷過程のシミュレーション、有限要素法、弾塑性解析法等による材料の破壊シミュレーションを可能にする。このように、原子力材料における基礎研究は、主に材料と放射線場との関わりによって特徴づけられる。

2. Standard Reference Index による研究引用動向調査結果

材料に関する調査では、分子動力学、核燃料、超伝導、半導体、同位体に関して、また、関連技術として熱伝達、放射線化学、レーザー、加速器、RIビームが取り上げられた。調査対象が必ずしも代表的な項目ばかりとはいえませんが、全体の傾向を見ると、計算手法の原理、損傷の基本モデルなどは過去10数年間、平均して引用され続けられている。また、材料の中でも超伝導、半導体は、将来性が期待されている、あるいは大きな産業基盤となっているため、引用度は高い。これに対してプロジェクトにかなり依存している課題については、注目を浴びる期間は一時的であり、長期間にわたって引用されることはなかった。

このように、より普遍的な原理を提供する研究は Standard reference になっているといえる。また、材料そのものが多くのシステムの基礎・基盤であることから、産業全体に大きなインパクトを与える材料研究文献は、原子力、非原子力に関わらず Standard reference になる。

以上のように、前章で述べた基礎研究に位置づけられる研究ほど引用される傾向が強いことが、この調査結果からも明らかとなっている。

3. 原子力材料の基礎研究の今後の方向

基礎研究は普遍的な原理を構築するとともに創造的・革新的技術を生み出すもとなる研究と位置づけられる。極限的な性能が要求される原子力システムにおける材料の基礎研究は、原子力のみならず産業全体の基盤の牽引者としてその期待されるころは大きい。

最近のビーム制御技術と計算機の高度化は原子力に係わる材料基礎研究を、物質段階であれ、工段階であれ、よりその進展を促す。以下に今後ますます重要となると考えられる材料研究分野を挙げた。

1. 照射損傷の基礎過程の解明

第1原理、分子動力学モデルでは、照射初期の材料損傷過程から、転位、ボイドの発達過程までの予測。

2. 耐照射損傷性新材料の開発

構造制御、同位体制御など新しい概念に基づく新材料開発

3. ビーム技術による材料制御

加速器、レーザー、プラズマ等を用いた非平衡物質・材料の創製

4. 時間・エネルギー・空間を精緻に制御したビームによる解析技術

原子レベルでのその場観察・分析技術、超短時間分解計測技術、マイクロビーム技術

5. 大型ビーム技術による計測・材料制御

高中性子束炉による長半減期核種の消滅、重元素科学、高輝度光による解析技術の高度化、高エネルギー・大電流ビームによる材料合成

6. 材料劣化のモデリングと寿命予測 複雑系の計算科学

7. 知的情報の整備と共有化 (野田委員)

<照射損傷>

核燃料工学分野のうちで重要な研究領域の一つである照射損傷の研究の歴史を見てみる。照射損傷の研究を、原子炉材料の研究、格子欠陥の研究、及び理論研究に大別し、その歴史を、原子力が初めて臨界に達した1942年以前の黎明期、それ以降、照射損傷の複雑さのゆえに研究がゆきづまった1960年代後半までの原子力発展期、1960年代後半から現在までの新しい展開期と、便宜的に3つの時期に分けて概観する(石野榮、「照射損傷」より)。黎明期には意識的に照射の効果を調べたものは少なく、自然現象の解

明に注目が向けられていた。原子炉材料の研究の流れにおいては、1914年のRutherford 散乱と1939年の核分裂の発見が大きな成果として挙げられる。原子力発展期では、最初の原子炉の実現と相前後して、1942年にWigner が原子炉材料における照射損傷の重要性を予言した。また、その頃マンハッタン計画において米国の既存の加速器を用いた材料照射研究が始められ、秘密裏にデータが蓄積されていった。これらの燃料・材料の基礎的な照射損傷挙動（例えばウラン金属の照射クリープ）は全て1955年の第1回ジュネーブ会議に一気に出された。その頃の照射クリープに関する最初の報告を二つ掲げる。・S.T. Konobeevsky, S.T. Pravdyuk and V.I. Kutaitsev, U.N. Conf. on Peaceful uses of atomic energy, Geneva, 1955, paper No. 681. ・A.C. Roberts and A.H. Cottrell, Phil. Mag. 1 (1956) 711. その後は、世界の各所で工学的データを蓄積していった。それらを発表した論文は画期的というより、工学的で泥臭いと言うべきものである。さらに、1950年頃から照射が単純な点欠陥を調べるのに有効な手段となるであろうとの期待から、格子欠陥の研究が始まった。しかしこの流れは、欠陥回復段階の解釈をめぐる十数年にも亘り考え方の対立が続いたように、1960年代に照射損傷の複雑さのゆえに行き詰まりに陥った。一方、照射損傷の理論研究では、荷電粒子損傷の基礎となるBohr理論の発表（1948年）、カスケード損傷に関するKinchin-Peaseモデルの発表（1952年）を経て、1955年頃までに古典的理論は一応の体系化がなされた(Seitz, Koehler, 1955年)。1960年代後半から現在までの新しい発展期においては、まず、工学的にはボイドスエリングが発見され（下記論文）、高速増殖炉や核融合炉における高温、重照射の問題が注目された（C. Cawthorne and E. J. Fulton, "Void in Irradiated Stainless Steel", Nature, Vol. 216, Nov. 1967, p. 575）。1970年前後から加速器を用いた中性子重照射のシミュレーションが広く行なわれるようになった。これに伴って古典論での計算以上に詳細な損傷の計算が要求されることになったが、その基礎は1963年Lindhardらによって包括的な統一理論が与えられていた(J. Lindhard, M. Scharff and H. E. Schiott, Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Math-Fys. Medd., 33(1963), No. 14)。格子欠陥の研究の流れの中では1970年代に入って、格子欠陥測定の様々な新手法が適用され、上記の欠陥回復段階の解釈をめぐる論争に決着が着けられた。現代の主要課題は、工学的には各種照射シミュレーション関連の問題、高エネルギー中性子照射損傷の問題、合金の損傷、理論的には結晶性をいかに取り込むかなど、困難な問題が残されており、研究が活発に進められている。ここで上に挙げた代表的な文献 Standard References についてその引用回数を見てみる。上記の照射クリープに関する最初の2つの論文は、調査した1980年以降は引用回数は数件である。最近殆ど引用されない理由として、古い論文であることが大きい。照射クリープを発見した論文であり、その理論付けをしたものではないため、その後の照射クリープ研究にとって重要性が低かったことも考えられる。ボイドスエリング発見に関する論文は、最近も少数ではあるが、引用されている。これはボイドスエリング関係の論文を書く際に、この歴史的な発見に触れる著者が多いためである。

と思われる。一方、LSS理論の論文は、照射損傷の計算のための基礎を与える論文であるため、最近も研究の盛んな材料の照射損傷研究者に多く引用されているものと思われる。このように、SCIの結果から、物理現象の発見も然ることながら、それを説明するための基礎理論が研究者にとって意味の大きいことが分かる。(新谷委員)

<中性子散乱>

1. 中性子散乱と中性子源

1994年ノーベル物理学賞が、原子炉を用いた中性子散乱実験法のパイオニアであるシャル(米)、ブロックハウス(加)両博士に授与された。両博士は第2次大戦後欧米で急速に建設が進んだ研究用原子炉からの安定した熱中性子ビームを用いて、物質を構成する原子の構造と運動を直接観測する実験手段を確立した。熱中性子は、(a)物質の原子間距離(数Å)と同程度の波長、(b)原子の振動数(THz)と同程度のエネルギー、さらに(c)最小の磁石としての磁気モーメントを持っている。シャル博士は1950年頃、磁性体に入射した中性子が特性(c)のため、磁性体内部の磁気モーメント(電子スピン)と相互作用して散乱され、さらに(a)のため異なる原子で散乱した中性子が互いに干渉する様子(回折)を解析して磁気モーメントの配列の仕方(磁気構造)を直接観測し、磁石の微視的起源の解明に大きく貢献した。一方ブロックハウス博士は、1950年代半ばに結晶に入射した中性子が振動している原子と非弾性散乱(特性(b))して干渉する様子を解析して、原子の集団的振動状態(格子振動)を直接観測し、その折考案した三軸型分光器とともに物性研究に大きな足跡を残した。

1960年頃までの研究用原子炉の多くは、新しく始まった原子力利用の可能性を探り拡大するために多目的であった。わが国の本格的な多目的研究用原子炉は1962年に臨界に達したJRR-2(10MW,原研東海)であり、続いて1964には京都大学の原子炉KUR(1MW、1968に5MWに上昇、熊取)、1965には国産第1号炉としてのJRR-3(10MW,原研東海)が稼働を開始した。欧米先進国に遅れること10~15年ということになる。一方、欧米ではこの時期にすでに強力な物質研究手段としての中性子散乱の将来性を的確に予測しており、中性子ビーム実験を主目的とした高性能原子炉建設が進んでいた。すなわち、米国では1965、1966に相次いで高中性子束原子炉であるHFBR(60MW,ブルックヘブン国立研究所BNL)、HFIR(100MW,オークリッジ国立研究所ORNL)が稼働し、本格的な中性子散乱実験が始まった。1970年代になると、それまでの熱中性子のみでなく、もっと波長が長く、エネルギーの低い冷中性子が、高分子や生体物質等の巨大分子の形態や運動の研究に極めて有用であることが分かった。そのため冷中性子を効率的に生み出す冷中性子源が考案され、1971に英独仏三国により建設されたHFR(58MW,ラウエランジュバン研究所ILL)は、その炉芯近くに液体水素溜を置いた冷中性子源とそのビームを損失なく導く中性子導管を備え、装置数も30を超える世界最大の中性子散乱研究施設として誕生した。それ以来現在に至るまでの四半世紀、

HFBR(BNL), HFIR(ORNL), HFR(ILL)の3基の原子炉が世界の3大高中性子束炉として活躍している。

一方我が国では1960年代半ばから JRR-2, JRR-3, KUR の3基を用いた中性子散乱研究が軌道にのってきたが、1970頃の各種中性子光学素子の開発により、最も中性子束の高い JRR-2 での非弾性散乱実験が可能になり、研究の幅が大きく広がった。しかし、上述の世界トップの原子炉とは中性子束にして40～50倍の開きがあり、国際協力研究も盛んに行われるようになった。一方、我が国でもこれらと並ぶ高中性子束原子炉建設の要望が高まり一時 KUR-II として実現しかかったが各種の要因により計画は撤回された。しかし、原研の原子力長期計画の一環として、多目的 JRR-3 をビーム実験を主目的とする研究炉に改造する計画が1980年代半ばから実施され、1990に改造3号炉 JRR-3M (20MW,原研東海)として生まれ変わった。この原子炉には液体水素を用いた冷中性子源も設置され、現在中性子散乱装置は22台(原研9台、大学13台)と世界一級の設備を誇る研究施設になった。次表に中性子散乱に利用されている現在稼働中の世界の主な原子炉を示す：

原子炉名	施設名(国名)	臨界達成/改造	熱出力	中性子束	装置数	冷中性子源
HFR	ILL(仏)	1971/94	58	15	26	有
HFIR	ORNL(米)	1966	100	10	11	有
HFBR	BNL(米)	1965	60	9	15	有
NBSR	NIST(米)	1969	20	4	24	有
ORPHEE	LLB(仏)	1980	20	3	22	有
JRR-3M	原研(日)	1965/90	20	2	22	有
FRJ-II	KFA(独)	1962/72	23	2	17	有
BER II	HMI(独)	1973/91	10	1.5	13	有
DR-3	Riso(デンマーク)	1960	10	1.4	7	有
JRR-2	原研(日)	1962	10	1	6	無
MURR	ミズーリ大(米)	1966	10	1	8	無
KUR	京大(日)	1964	5	0.8	7	有

この表で(最大)熱出力はMW、(最大)中性子束は 10^{14} neutrons/cm²/sec の単位で表わしてある。JRR-2 は JRR-3M 完成前は我が国で唯一の非弾性散乱実験可能な高性能炉であったが、1996年12月に廃炉に向けて永久停止した。このため現在 JRR-3M と KUR の2基が我が国の中性子散乱用研究炉である。

2. 中性子散乱研究の流れ

この節では引用文献調査にもとずき中性子散乱研究の流れを分析する。調査した文献は
(a) A.D.B. Woods, W. Cochran and B.N. Brockhouse, "Lattice Dynamics of Alkali Halide Crystals", Phys. Rev. 119 (1960) 980.
(b) M.J. Cooper and R. Nathans, "The Resolution Function in Neutron Diffractometry: I. The Resolution Function of a Neutron Diffractometer and Its Application to Phonon Measurements", Acta Cryst. 23 (1967) 357.
の2編である。

(a)はノーベル賞受賞者のブロックハウス自身も共著者であるが、最も標準的物質である食塩 NaCl のフォノン（格子振動）分散曲線を初めて中性子非弾性散乱で測定した仕事である。3つの主軸沿いに音響、光学フォノン全てを測定し、さらにそれらのデータを剛体イオンモデルと殻モデルを用いて解析して、後者のモデルでほぼ完全に記述できることを示した。フォノンの測定と解析の最も標準的文献として以後多く引用されているが、本文献調査の1974年以降はむしろ固体物理の教科書に格子振動の典型例として載るほど標準化されたものとして扱われ、そのため特に1980年以降原論文の引用は減少したものである。さらにまた、食塩型構造をもつ結晶のフォノン分散の測定値に、殻モデルの計算値をフィティングするコンピューターコードが出来上がっているため、原論文まで引用されることが少なくなったと思われる。フォノン分散曲線の測定により、固体を構成する原子間力の情報を直接得ることができるので、食塩以外のより複雑な結晶についても測定が行われるようになり、対象となる物質は急増しているのが現状である。

(b)は中性子の非弾性散乱測定をするとき、実験装置（三軸型分光器）の分解能を考慮することが極めて重要であることを定量的に示し、しかもその計算式（分解能関数）を具体的に与えた論文であり、中性子散乱のエキスパート必携の知識となっている。精密測定になればなるほどその分解能補正の重要性は増してくるが、その分解能関数の計算は装置制御・データ解析プログラムに組み込まれているほど標準化されて利用されてきているので、特に1980年代以降の原論文引用が減少していると思われる。事実最近の高温超伝導体の研究等においては極めて高度な測定が行われるため、それらのデータは全てもともとこの論文が記述している数式に従って分解能補正を行い、物質固有の応答関数を求める手続きを踏んでおり、ますますこの論文の重要性は高く認識されている。

3. 中性子散乱の役割と今後の発展

中性子散乱は熱中性子と冷中性子を目的に応じて使い分けている。丁度カメラのズーム作用と同じで、たとえば森の中に入って一本一本の木の種類と生えている位置（物質中の原子や分子の種類とその位置）を覗くのは熱中性子、それらの木が集まって作っている森の形（巨大分子や組織の形）を覗くのが冷中性子といった具合である。中性子は原子核で散乱されるので、X線散乱と対照的に原子番号の小さな元素（特に水素）でも十分その散

乱能は大きく、さらに水素と重水素ではその散乱能が大きく異なる。このため水素や水が基本的に重要な役割を果たす高分子や生体物質の研究には不可欠のプロブである。このため巨大分子を観るプロブである冷中性子が利用できるようになった1970年代以降のこの分野（高分子材料、生命科学）の発展は目を見張るものがあり、21世紀の中性子散乱研究の中心テーマの一つである。

一方、高温超伝導体に代表されるように新物質開発は、新しい物理現象の発見から工業的応用まで幅広い分野にインパクトを与えるが、新物質の物性・機能の微視的起源の研究には中性子散乱が最も強力な実験手段を提供する。すなわち、中性子散乱は原子や磁気モーメントの位置、向き、運動の情報を総合的に観測できる唯一の測定法であり、その重要性はますます高まっている。

さらにまた中性子は高い物質透過率を持つので、航空機エンジンのタービン翼や溶接したパイプ内部の歪などを精密に測定できる。このような工業的利用は欧米では比較的早くから行われていたが、我が国ではビームタイムと専用測定装置の不足から原研が細々と続けているに過ぎない。しかし、今後この種の工業的利用はますます拡大するであろう。

中性子散乱の測定方法で今後大きく発展することが期待されているのは、中性子の磁気モーメント（スピン）の方向を揃えた偏極中性子ビームを利用するもので、極めて感度のよい精密測定のプロブを提供する。そのためには十分高い中性子束と優れた光学素子の開発が必要である。

以上のように、中性子散乱は基礎研究から工業的応用まで、また物性物理から生命科学まで幅広い分野で利用される優れた実験手段である。しかし、高い中性子束を必要とするので高性能の中性子源が不可欠であり、これまで主として原子炉が用いられてきた。一方1980年頃から、加速器からのパルス状二次ビームとしての中性子を利用する方法が実用化されている。そのスペクトルは熱中性子よりさらに短波長、高エネルギーの熱外中性子まで及び、広いダイナミックレンジの測定に向いており、独自の測定方法と測定領域を開拓してきた。今後これら2種類の中性子源、原子炉からの定常中性子と加速器からのパルス中性子を相補的に利用した研究が幅広く展開されるであろう。（藤井委員）

<レーザー核融合>

レーザーが1960年に実現すると同時に、米国、ソ連で、高出力レーザーを重水素・3重水素のターゲットに集光照射し核融合反応を行わせる計画が、進められた。当初、研究は非公開で進められたが、1964年、N. Basov 等がガラスレーザーを重水素化リチウムに照射し、中性子が発生する実験を発表した(1)。米国は、1972年になって、J. Nuckolls 等がレーザー爆縮核融合の概念を公表し、必要レーザーエネルギーが、燃料を高密度化することにより密度の2乗に反比例することを示した(2)。これより、米国、ソ連、欧州、日本で本格的なレーザー核融合研究が展開されるようになった。

一方、日本においてもレーザーとプラズマの相互作用の研究が進められてきたが、19

68年には異常吸収の理論が西川により提案され(3)、山中等により実験的に確かめられた(4)。これは、古典吸収においては、レーザー強度が増加するにつれ、レーザーの吸収率が低下するが、しきい値以上のレーザー強度では、再びレーザーの吸収率が増加することを示したものであり、レーザーとプラズマの相互作用の研究分野に強いインパクトを与えた。1970年頃から核融合研究用高出力レーザーシステムは、米国を中心に世界各国で開発された。1983年に稼働を開始した大阪大学レーザー核融合研究センターの12ビームガラスレーザー“激光XII号”は、当時世界最大出力57TWを達成した(5)。その後、米国ローレンス・リバモア研究所に100TWのガラスレーザー“ノバ”が完成し(6)、現在も世界最大のレーザーシステムである。核融合研究用高出力レーザーとして、ガラスレーザー、炭酸ガスレーザー、エキシマーレーザー、ヨウ素レーザー等が開発されたが、現在主に稼働しているレーザーはガラスレーザーである。これは、高出力、短パルス、高集光性能等の核融合用レーザーとして必須の性質を有していることに加え、波長変換により短波長化が容易なこと、および動作の信頼性が極めて高いことによる。

1980年代なかばに高出力レーザーシステムの建設は、一段落を終え、その後レーザー爆縮実験と爆縮性能向上のための、均一レーザー照射技術の開発に精力が注がれた。この間、レーザー吸収過程、エネルギー輸送、各種流体不安定性等の物理が明らかにされるとともに、爆縮性能も著しい進展を示した。発生中性子数は、10兆個/ショットが達成されており(7)、この値は、照射レーザーエネルギーの0.2%程度が核融合反応エネルギーに変換されたことに対応する。また、爆縮コア密度に関しては、固体密度の600倍が達成された(8)。さらに、均一レーザー照射技術の開発により、より高い爆縮性能が得られようとしている。これらの成果をふまえ、米国では1995年60ビーム30kJのオメガ改良装置が稼働を開始、1997年5月192ビーム、1.8MJの点火実験装置(NIF)(9)の建設が開始された。NIFにおいては、点火の実証および核融合エネルギーが照射レーザーエネルギーを上回ること(10-20倍)が期待されている。 实用レーザー核融合炉の概念設計は、レーザー核融合研究の進展とともに、各国で実施されてきた。レーザー核融合炉の特徴は、第一壁の設計と燃料ターゲットの設計を独立に行えるところにあり、液体リチウム流を第一壁に使った比較的単純な概念設計が提案されている。炉用レーザーとしては、高効率(5-10%)、高繰り返し(~10Hz)の10MJ級レーザーがひとつであり、半導体レーザー励起の高効率、高繰り返し固体レーザーが近年注目されている。レーザー核融合研究において特筆すべき点は、基礎科学の進展への寄与である。レーザー物理、非線型光学、プラズマ物理は当然のこととして、高温プラズマからの輻射スペクトル計測は、原子物理に多大の貢献を及ぼしたことをはじめ、流体物理、超高密度物性、および宇宙物理への寄与が期待できる。特に、宇宙物理分野では、超新星爆発での観測結果より推論されている核燃焼波のレーリー・テラー不安定性が、レーザー核融合の爆縮中にも生じ、宇宙物理での課題が、レーザー核融合爆縮により実験室内で検証しうることで示唆されている。レーザー核融合研究の現状は、プラズマ・核融合学会誌「核融合研究」

別冊に詳細に報告されているので、参考にされたい(10)。

- (1) N. G. Basov and O. N. Krokhin: JETP, vol. 46, 171 (1964)
- (2) J. Nuckolls et al.: Nature, vol. 239, 139 (1972)
- (3) K. Nishikawa: J. Phys. Soc. Japan, vol. 24, 916 (1968)
- (4) C. Yamanaka et al.: Phys. Rev., vol. A6, 2335 (1972)
- (5) C. Yamanaka et al.: IEEE J. Quantum Electron. vol. QE17, 1639 (1981)
山中千代衛: レーザー研究, vol. 11, 586 (1983)
- (6) D. R. Speck et al.: IEEE J. Quantum Electron. vol. QE17, 1599 (1981)
K. R. Mane et al.: J. Opt. Soc. Am., vol. 2, 528 (1985)
- (7) C. Yamanaka et al.: Phys. Rev. Lett., vol. 56, 1575 (1986)
- (8) H. Azechi et al.: Laser and Particle Beams, vol. 9, 193 (1991)
- (9) J. R. Murry et al.: Solid State Laser II, SPIE 1410, 28 (1991)
- (10) プラズマ・核融合学会誌「核融合研究」別冊, vol. 68 (1992)
(藤田委員)

<原子炉物理>

本分野の名称には“物理”という言葉が付けられているが、いわゆる理学ではなく、原子炉を建設することを目的に、工学として成熟してきた比較的新しい学問分野であるということが出来る。原子炉は核分裂の連鎖反応を利用してエネルギーあるいは中性子を取り出す工学施設なので、原子炉を建設するためには中性子の輸送現象、核分裂を含む中性子と物質の相互作用に関する学問的理解が必要不可欠となる。

中性子の存在は、Beに α 線を当ててBeの原子核を破壊する際、透過力の極めて強い放射線が出ることをJoliot-Curie夫妻が発見したことに続き、1932年にChadwickが、その反応の際にBeの原子核から電氣的に中性で、かつその質量が水素原子核の質量に等しい未知の粒子が叩き出されると考えて、Be-9(α ,n)C-12反応を説明したことにより明らかとなった。また、原子核分裂は、1934年にFermi等が中性子をウランに当てて4種類の放射能が生成することを見出したことにより発見されたと言える。実際には、1938年にHahn等が化学的にBaが生成されることを確かめたことにより、核分裂という現象が確認された。核分裂の連鎖反応に基づく世界最初の原子炉、シカゴ・パイルは1942年に臨界を達成した。

中性子の存在が明らかになり、核分裂反応が発見されて核分裂反応により大量のエネルギーと複数の中性子が放出されることがわかってから、核分裂の連鎖反応を制御することによって原子炉を実現するまでに僅か10年の歳月しか要しなかったことは驚きである。いずれにしろ、ミクロの世界とマクロの世界を結びつける原子炉物理の分野はこの間に生まれ、急速に発展して、1950年代には世の中に数多くの商業用及び研究用原子炉が建

設され、運転されるに至った。これは、この分野に関連する殆どの Standard Reference は当時のものであることを示唆している。

上述のように原子炉物理は、極言すれば、中性子と原子核の反応という原子核反応の素過程と集団として中性子の挙動を記述する Boltzmann の輸送方程式からなる学問であるということができる。本調査の SCI で比較的被引用件数の多かった 1946 年公刊の E.P.Wigner の "Resonance Reaction and Anomalous Scattering", Phys. Rev., Vol.70 (1946) p.15 は原子核反応の内、共鳴吸収反応と散乱反応に関するものである。SCI の内容を見ると、原子炉物理学の分野でこの文献が引用された回数は極めて少なく、本来の理学的な原子核物理の分野で多く引用されている。これは、原子炉物理の分野では必ずしも原子核反応そのものを研究の対象としているわけではなく、原子核物理の成果を応用することに主眼が置かれているためであろう。原子炉物理の分野では、素過程を扱う原子核物理の成果は、殆どの場合、教科書あるいはハンドブックの形にまとめられ、實際上、核物理の原理・原則については核物理分野の研究に委ねるという立場で研究を進めているため、必然的に SCI に表れるような形で直接的にそれらの Standard Reference を何度も引用するという事は滅多にない。一方、Boltzmann の輸送方程式の解法にしても、いくつものアプローチがあるが、それらの基本形となるものは既に教科書に収録されており、しかも先人の成果を次々と発展させるという形で研究が進められているので、SCI に Standard Reference 的に何度も繰り返し引用されるというような形にはなりにくい。"工学"である原子炉物理の分野の Standard Reference を強いて挙げるとすれば、SCI に直接表れることはないが、過去の成果を集大成した教科書ということになろう。実際、この分野では多くの優れた教科書やハンドブックが出版され、研究・教育に活用されている。

原子炉物理の基礎研究は原子力研究の中で極めて重要な働きをする。原子力研究では放射線を扱うことが避けられない。原子炉の型式としても、現在、安定的に稼働している型式のもの他に多くのものが考えられる。これらの成立性を検討するためには、原子炉物理の基礎研究が不可欠である。勿論、現在稼働中の型式の原子炉の性能や安全性をより一層向上させるためにも基礎研究は不可欠である。何度も繰り返すが、原子炉物理は核分裂の連鎖反応を制御するシステムとしての原子炉を建設するために誕生した学問分野であり、本来は中性子と原子核の反応の素過程と中性子集団の輸送現象を記述する方程式に立脚している。換言すれば、ミクロとマクロの現象を結びつける、あるいはミクロからマクロまでを統一的に記述した学問分野である。この中性子を他の放射線、 γ 線や種々の粒子線に置き換えるだけで、原子炉物理の枠組みの中で原子炉以外の放射線を取り扱う施設の諸問題にも役立てることができる。さらに、原子炉物理は、放射線による発熱の問題や放射線損傷あるいは放射線の生体影響の基礎過程の解明等にも応用することができる。原子力研究では放射線の取扱いが不可欠であることを考えると、ある意味で原子炉物理は原子力研究の要の学問であるということもできる。原子炉物理の成果は、特に中性子や放射線の取扱いを余儀なくされる施設、具体的には原子炉に限らず、加速器、核融合施設等の建

設の際にも応用されるものであり、より一層の発展が望まれる。(代谷委員)

1. 2 図式化とまとめ

1.2.1 INIS からみた原子力に関わる科学と技術の成り立ち

INIS は原子力情報に関する代表的文献データベースで、今回の調査では172万549件の文献情報を含む6枚のCD-ROMを活用して、主として1975年以降の原子力研究の素描を試みた。図1.3.1は、発表年次別の文献数の統計である。事象の発生から、論文・特許などの形での投稿・申請、レポート・本や学会誌などの形での公刊、抄録作成、分類、デスクリプタの付与等の編集作業を経て、データ入力、データベースへの収録に至る過程では、さまざまな要因で時間遅れが生ずるため、同一の発表年でもデータベース収録には数年の違いが生ずる。この事実を配慮して、研究動向の時間的推移は発表年が1994年までの文献を対象とし、分野間の相対的な比較を行う場合は全データを解析対象とした。なお発表年フィールドの値から判断して、172万549件のレコードの中には、明らかに誤りと思われるデータが数十件あり、少なくとも数千 ppm のノイズは存在する。

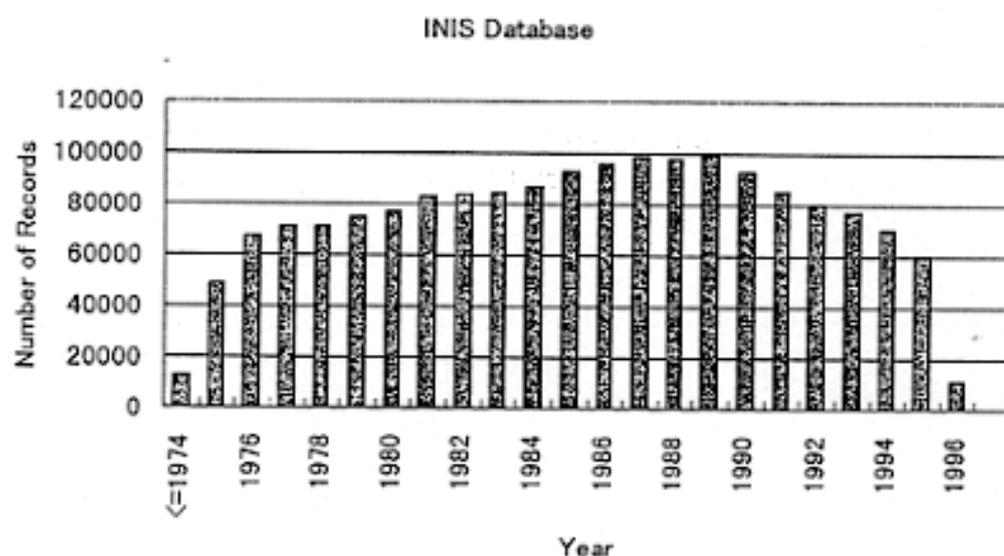


図 1.3.1 発表年次別の文献数

図1.3.2は、A分類(物理)、B分類(化学、材料と地球科学)、C分類(ライフサイエンスと環境科学)、D分類(同位体、同位体利用と放射線利用)、E分類(工学と技術)、F分類(原子力と非核エネルギーのその他の面)、G分類(物理:従来のAに代わって1992年より新たに導入された分類項目)の収録文献数の推移である。論文数と当該分野の研究開発活動とは必ずしも対応しないが、世界で現在約5万人余の原子力学会の会員や関連す

る学協会、産業界、政府機関、研究所の関係者の日常活動を計測するための一つの指標として文献数を参照することができる。

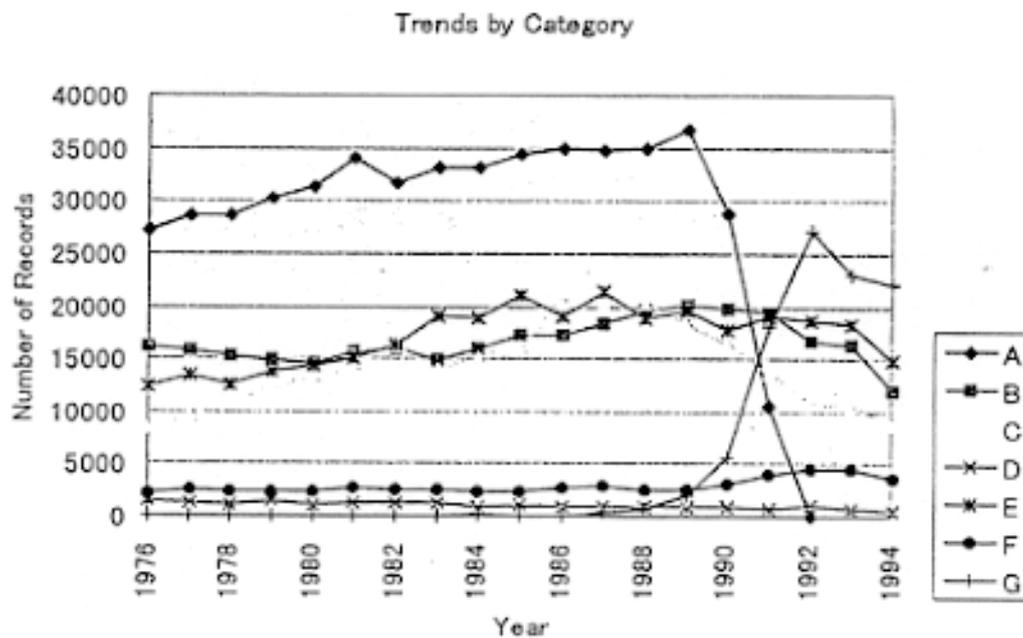
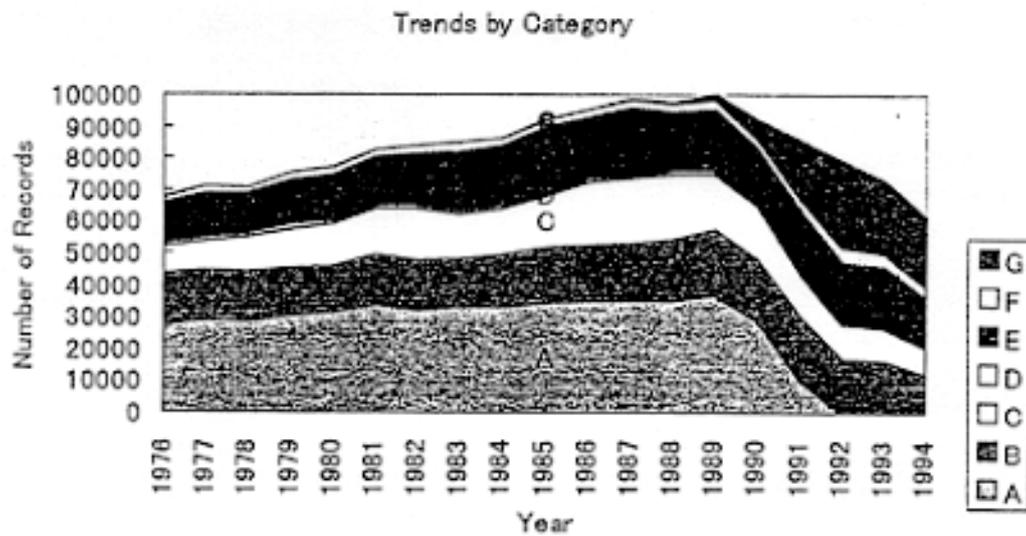


図 1.3.2 大分類別の収録文献数の推移

図 1.3.3 に、全収録文献の分野別の割合を示す。物理が40%程度で、化学、材料と地球科学分野と工学と技術がそれぞれ約20%、ライフサイエンスと環境科学が17%、同位体、

同位体利用と放射線利用が1%、原子力と非核エネルギーのその他の面が4%である。表1.3.1にリストを分類項目一覧をしめた。INISの文献データを論分数でのみ解析する場合、基礎的研究あるいは基盤的研究の動向を検討するための比較的良好な情報のコレクションであること、プロジェクト的研究に関しては大部の報告書として成果が公表されることが多いため文献数と研究開発活動の実態とは乖離があることに注意しなければならない。

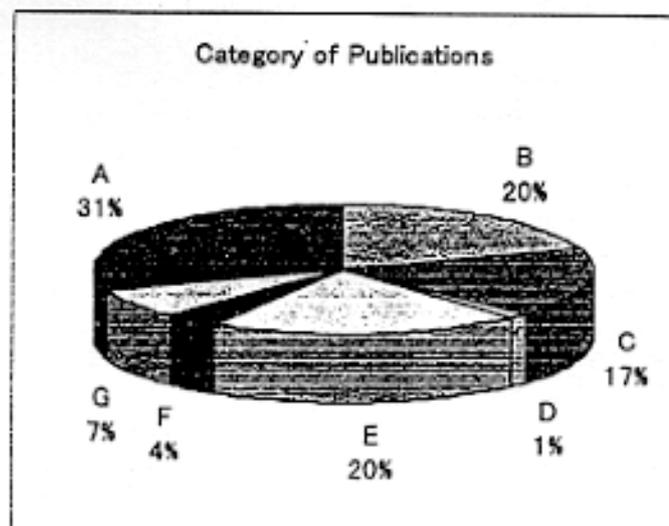


図 1.3.3 全収録文献の分野別の割合

A、G分類（物理）に関しては全収録件数の約38%を占める。中分類A0-A4、G0-G65の推移を図1.3.4、図1.3.5に、小分類A00-A41、G10-G65の推移を図1.3.6、図1.3.7に示す。分野に関しては、数理物理と理論物理一般、原子物理と分子物理、固体物理と流体物理、プラズマ物理と熱核反応、天体物理と宇宙論、宇宙線、素粒子、核物理、核の性質と反応に関する文献数が多く、G分類が導入されてからは天体物理と宇宙論、宇宙線に関する項目がなくなり、上記項目に加えて新たな分類項目として提示された凝縮物質の物理学が大きな割合を示している。

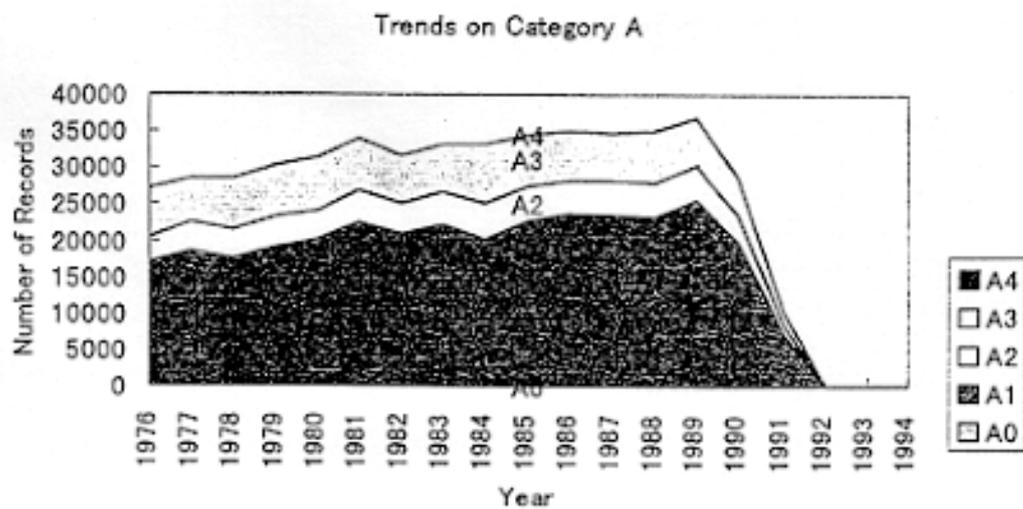


図 1.3.4 中分類 A0-A4 の推移

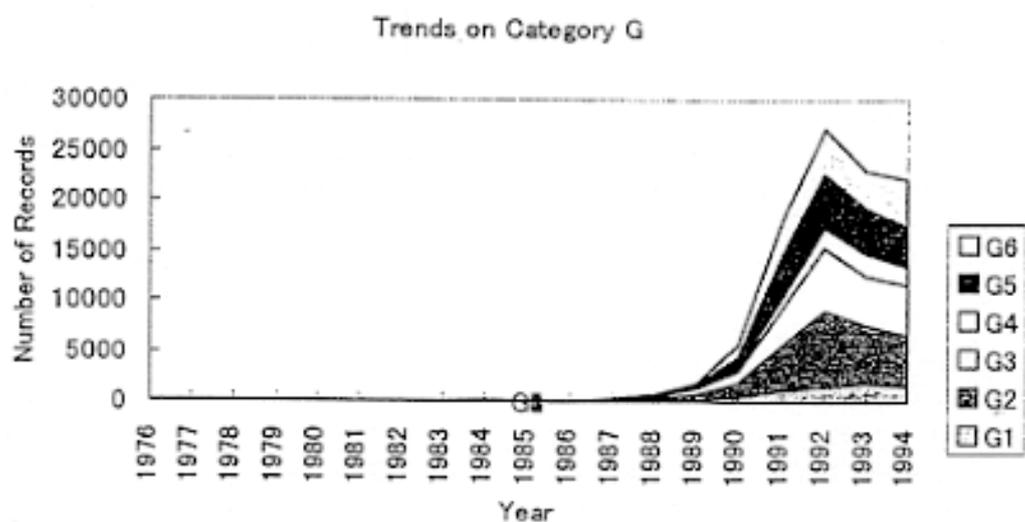


図 1.3.5 中分類 G0-G65 の推移

Trends on Category A**

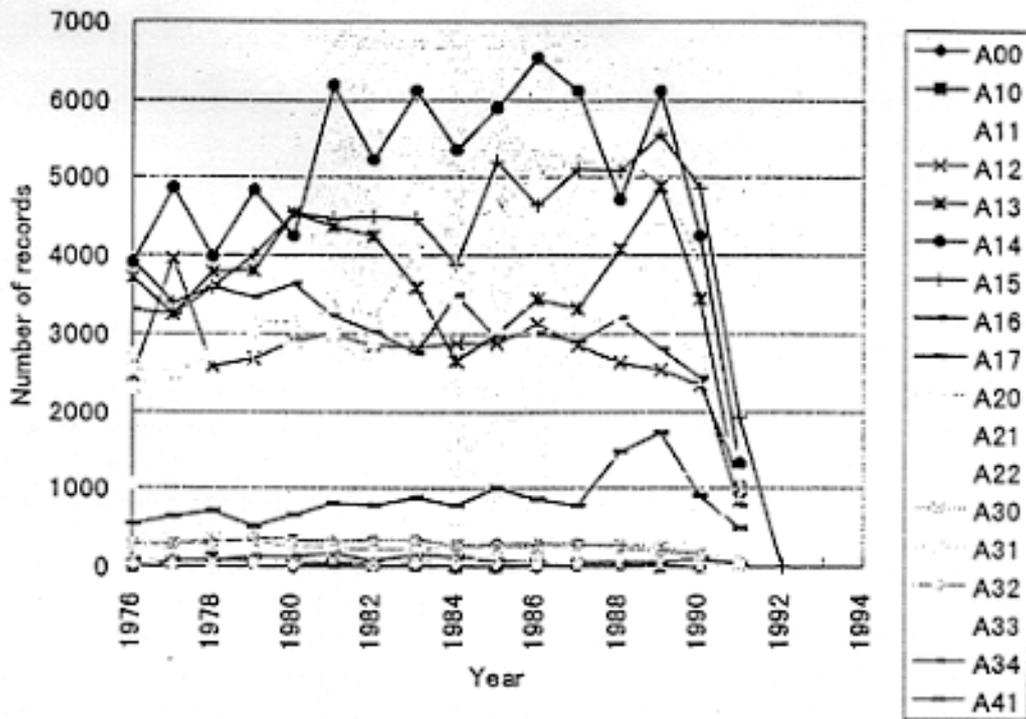


図 1.3.6 小分類 A00-A41 の推移

A0:物理、A1:物理一般、A2:高エネルギー物理、
A3:中性子物理と核物理、A4:その他

Trends on Category G**

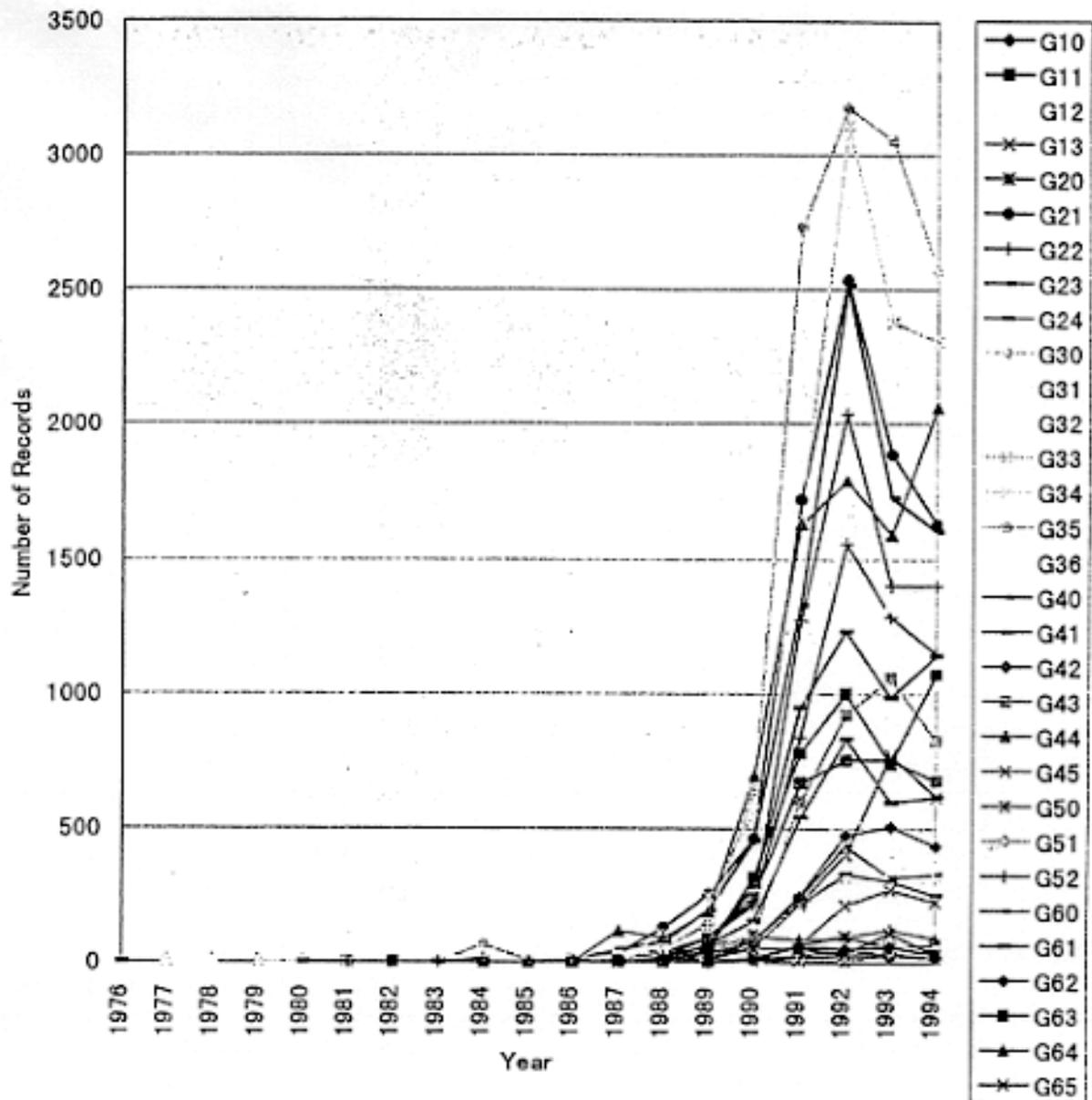


図 1.3.7 小分類 G10-G64 の推移

G0* : 物理、G1* : 物理一般、G2* : 素粒子と場の物理学、
 G3* : 核物理 (理論と実験)、G4* : 原子物理と分子物理、
 G5* : プラズマ物理と核融合、G6* : 凝縮物質の物理学

B分類（化学：B1、材料：B2と地球科学：B3）に関しては全収録件数の約20%を占める。中分類B0-B3の推移を図1.3.8、小分類B10-B33の推移を図1.3.9に示す。分野に関しては、金属、合金、無機化学、有機化学と物理化学、化学分析と同位体分析、材料、セラミックスなどに関する文献が大きな割合を示している。また地球科学分野では陸地や大気に関する論文が多い。

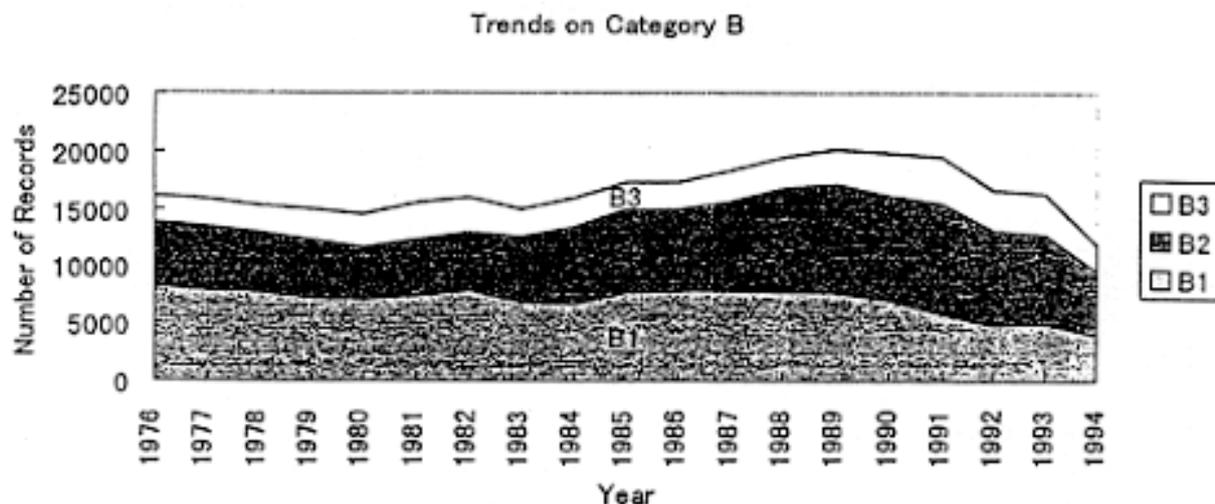


図 1.3.8 中分類 B0-B3 の推移

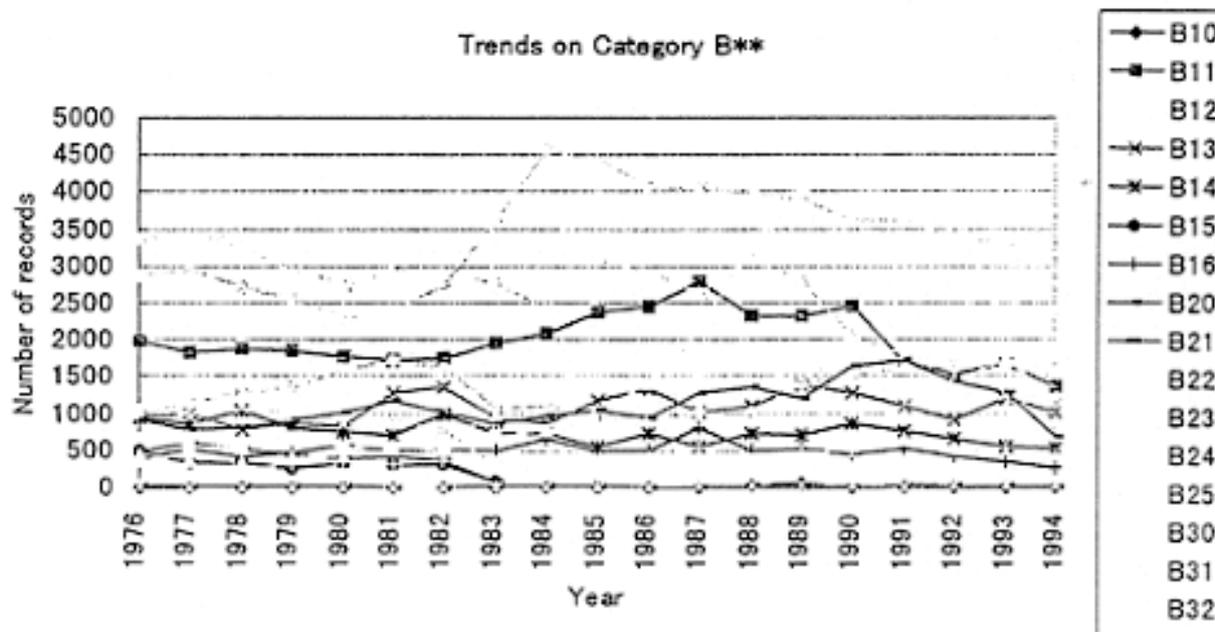


図 1.3.9 小分類 B10-B33 の推移

C分類（ライフサイエンスと環境科学）に関しては全収録件数の約17%を占める。中分類C0-C6の推移を図1.3.10、小分類C10-C64の推移を図1.3.11に示す。分野に関しては、

C1、C2は生物学的照射効果であるが、C分類全体の中では放射線医学と核医学（C6）、保健、放射線防護と環境（C5）、特に診断における外部放射線、RIに関する文献が多く、ライフサイエンスへの応用（C4）に関しては、核および非核エネルギーの環境的観点に関する文献が多い。他分野と異なる点は研究動向の変化の幅が大きいことである。診断における外部放射線、RIに関する収録件数は再度増加の傾向を見せている。

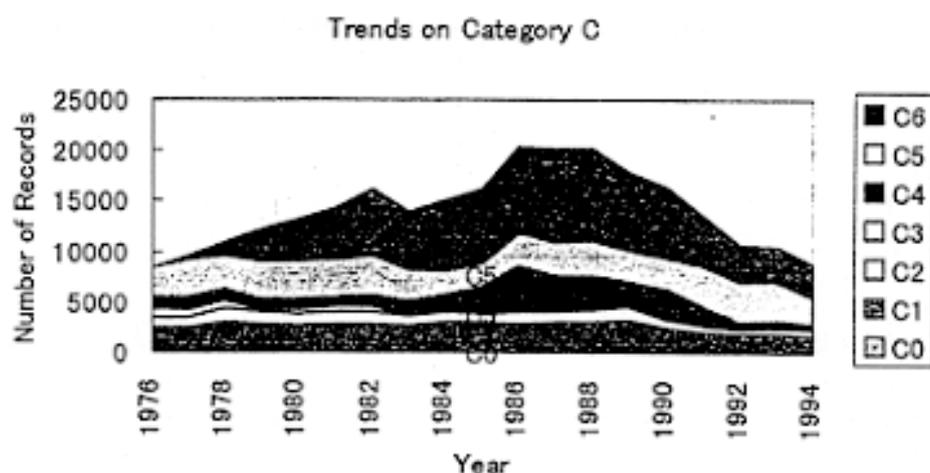


図 1.3.10 中分類 C0-C6 の推移

D分類（同位体、同位体利用と放射線利用）に関しては全収録件数の約1%を占める。中分類 D0-D2 の推移を図 1.3.12、小分類 D00-C24 の推移を図 1.3.13 に示す。総収録件数としては少ないが工業利用、放射線計測に関する研究が多い。

E分類（工学と技術）に関しては全収録件数の約20%を占める。中分類 E0-E5 の推移を図 1.3.14、小分類 E00-E52 の推移を図 1.3.15 に示す。工学、原子炉、計装、廃棄物と、それぞれの分野での文献数はほぼ定常的な推移を示している。加速器、粒子、放射線の検出、測定装置と方法、動力炉、廃棄物関係の収録件数が多い。特に、第一次、第2次石油危機以降に動力炉関係の論文数の増加があり同様の傾向が近年の加速器関係の収録件数にみられるが、前者は実用化に対応したものであり後者は近年の学術研究における加速器応用の拡大を反映したものであろう。また、上述のデータベース化に至る時間遅れの関係で収録件数は最期の数年で通常右下がりになる傾向があるが、廃棄物処理に関しては右上がりの傾向を示しており、研究活動の活性化を示唆している。

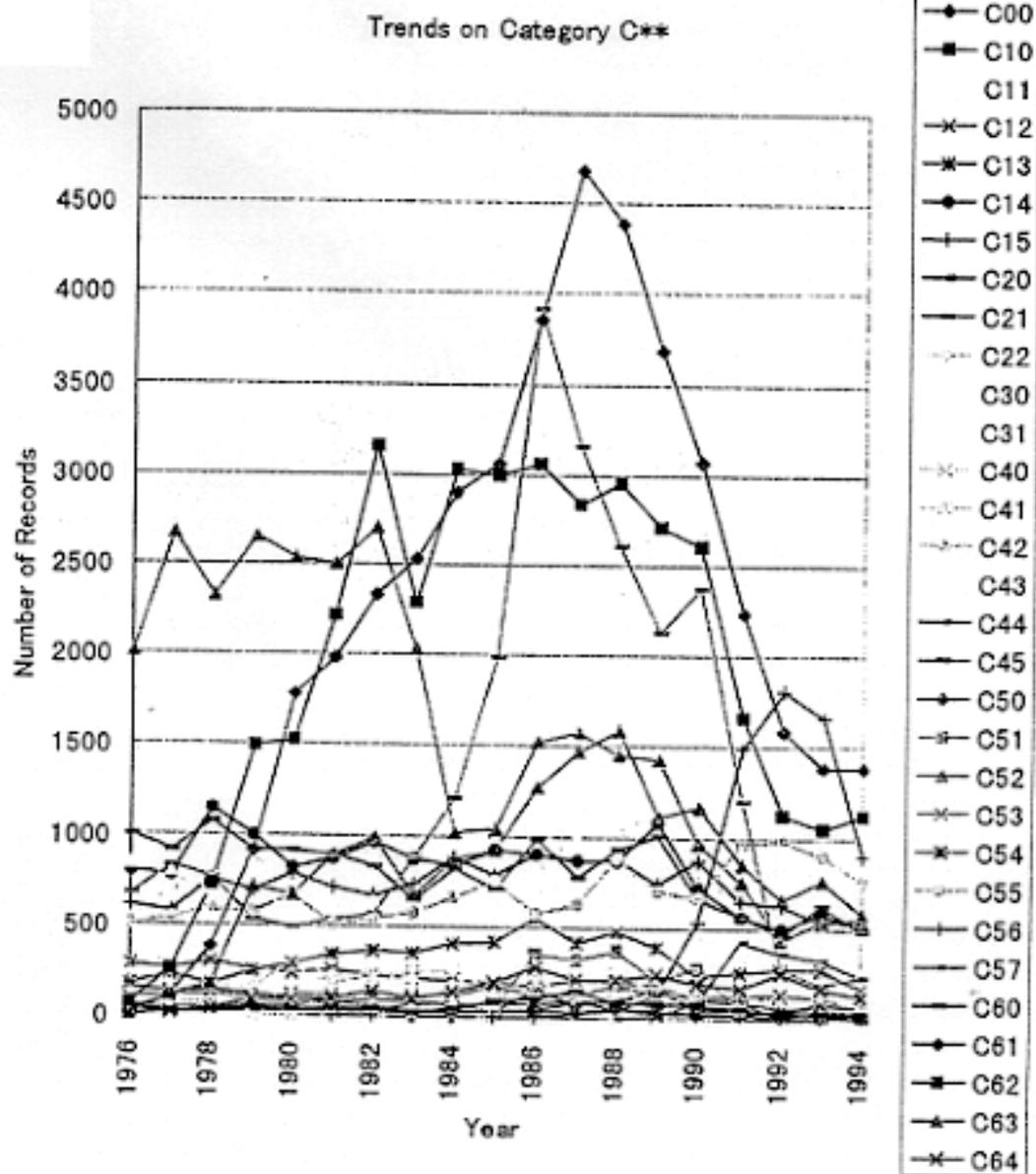


図 1.3.11 小分類 C10-C64 の推移

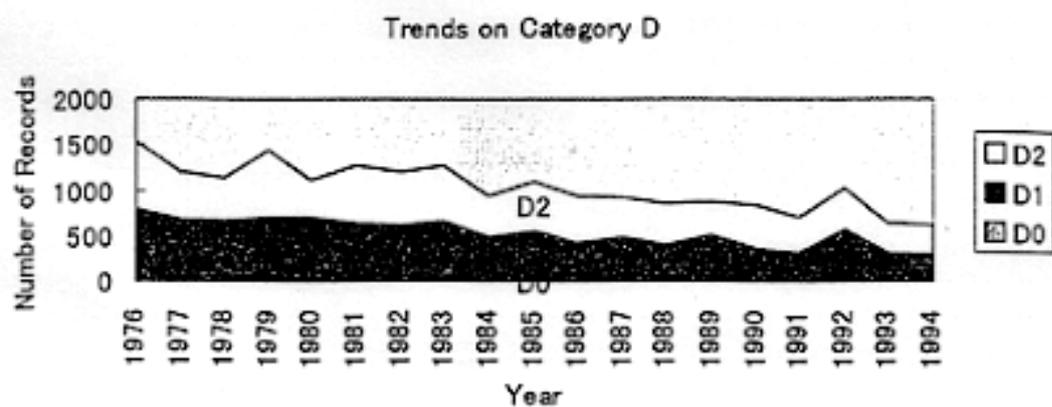


図 1.3.12 中分類 D0-D2 の推移

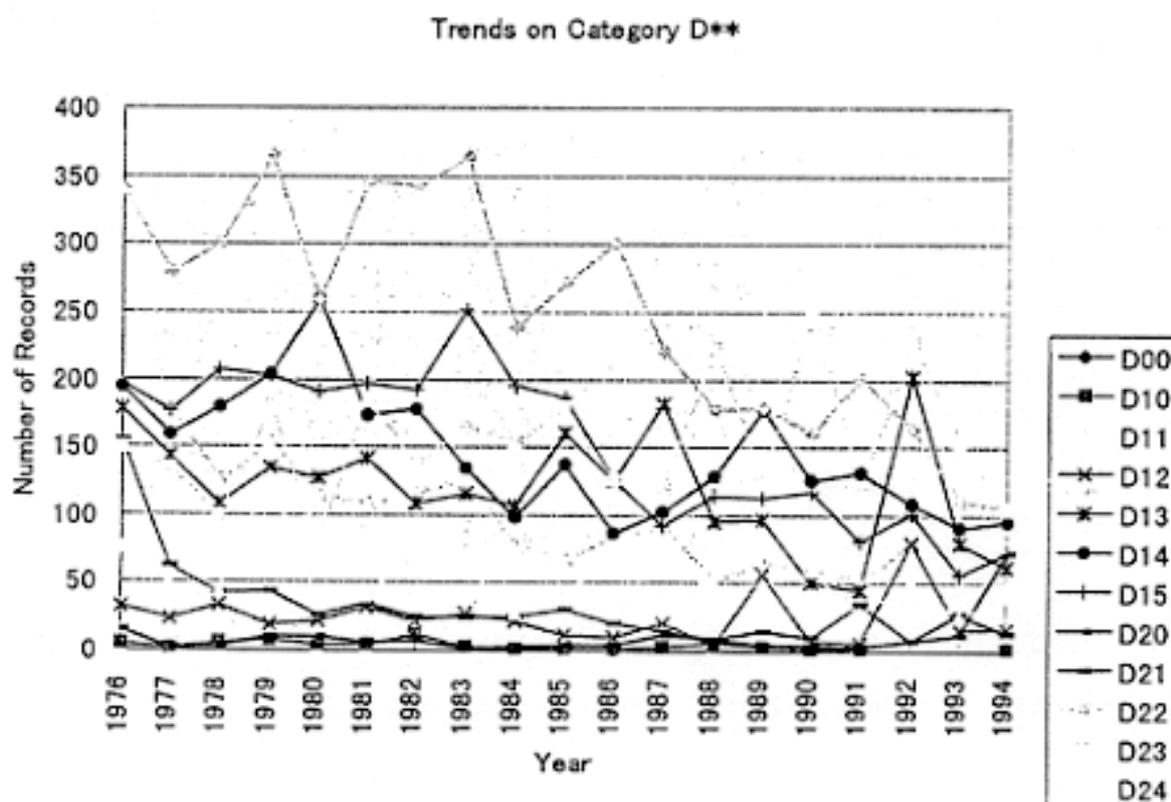


図 1.3.13 小分類 D00-C24 の推移

D1* : 同位体一般

D2* : 同位体利用と放射線利用

Trends on Category E

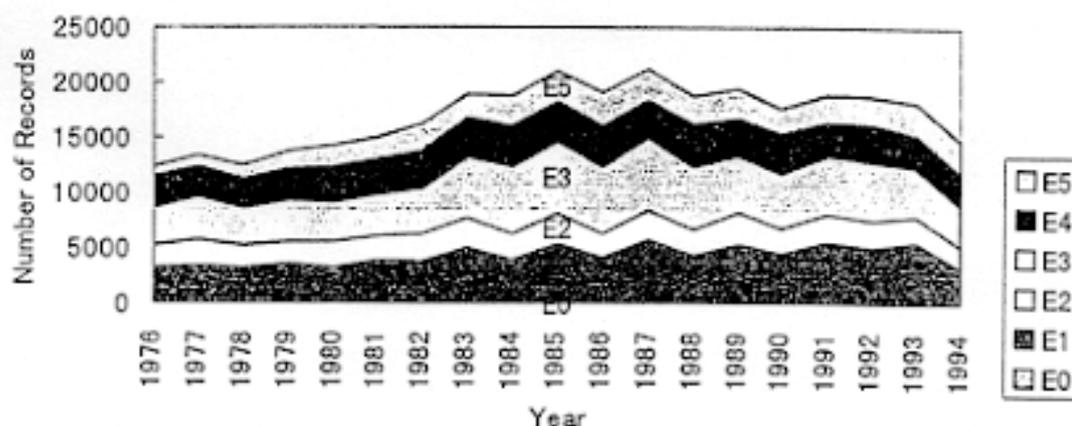


図 1.3.14 中分類 E0-E5 の推移

F 分類（原子力と非核エネルギーのその他の面）に関しては全収録件数の約 4% を占める。中分類 F0-E6 の推移を図 1.3.16、小分類 F10-E62 の推移を図 1.3.17 に示す。1990 年代に入ってから増加傾向が顕著で、技術的実証の後の経済性の評価やチェルノブリ事故以降の社会の中での巨大技術についての関心の高まりを反映している。分野に関しては、核エネルギーを非核エネルギーと対置させて、その再評価、比較、代替を検討するような論文が増えている。このことは、「特別扱いの原子力」から「社会的受容も含めて、市場において十分に競争力のある普通の技術」への展開が開始されたことを示唆するものであり、科学技術と社会とのダイナミックな関係がようやく本格化したことを意味していると考えられることもできる。

Trends on Category F

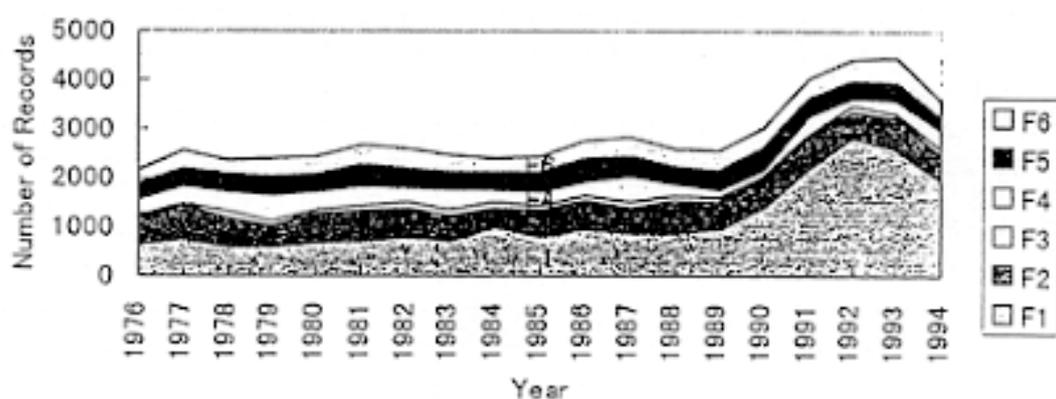


図 1.3.16 中分類 F0-E6 の推移

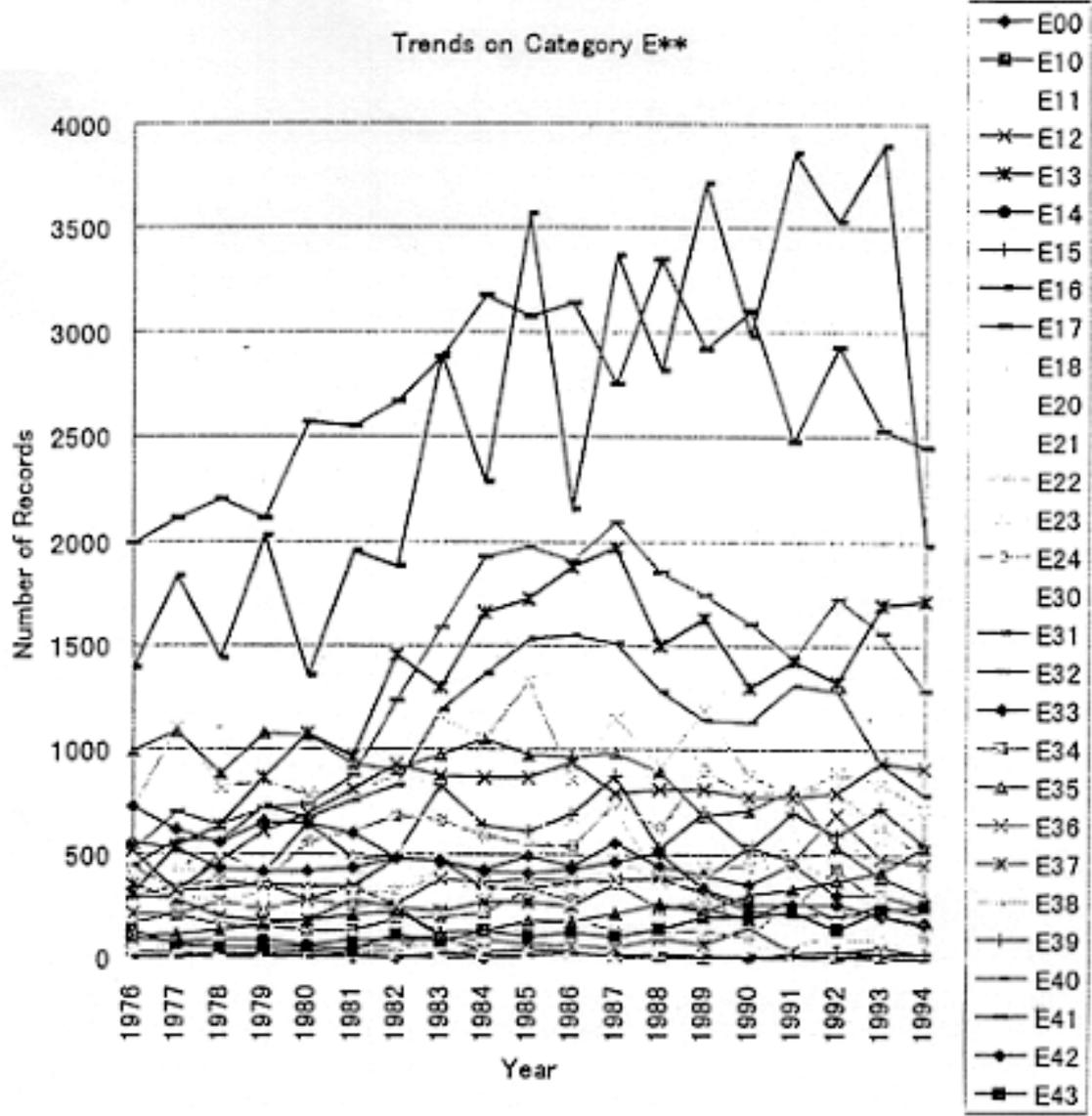


図 1.3.15 小分類 E00-E52 の推移

E1* : 工学、E2* : 原子炉 (一般)、
 E3* : 特定の型の原子炉と関連プラント、
 E4* : 計装置、E5* : 廃棄物関連

Trends on Category F**

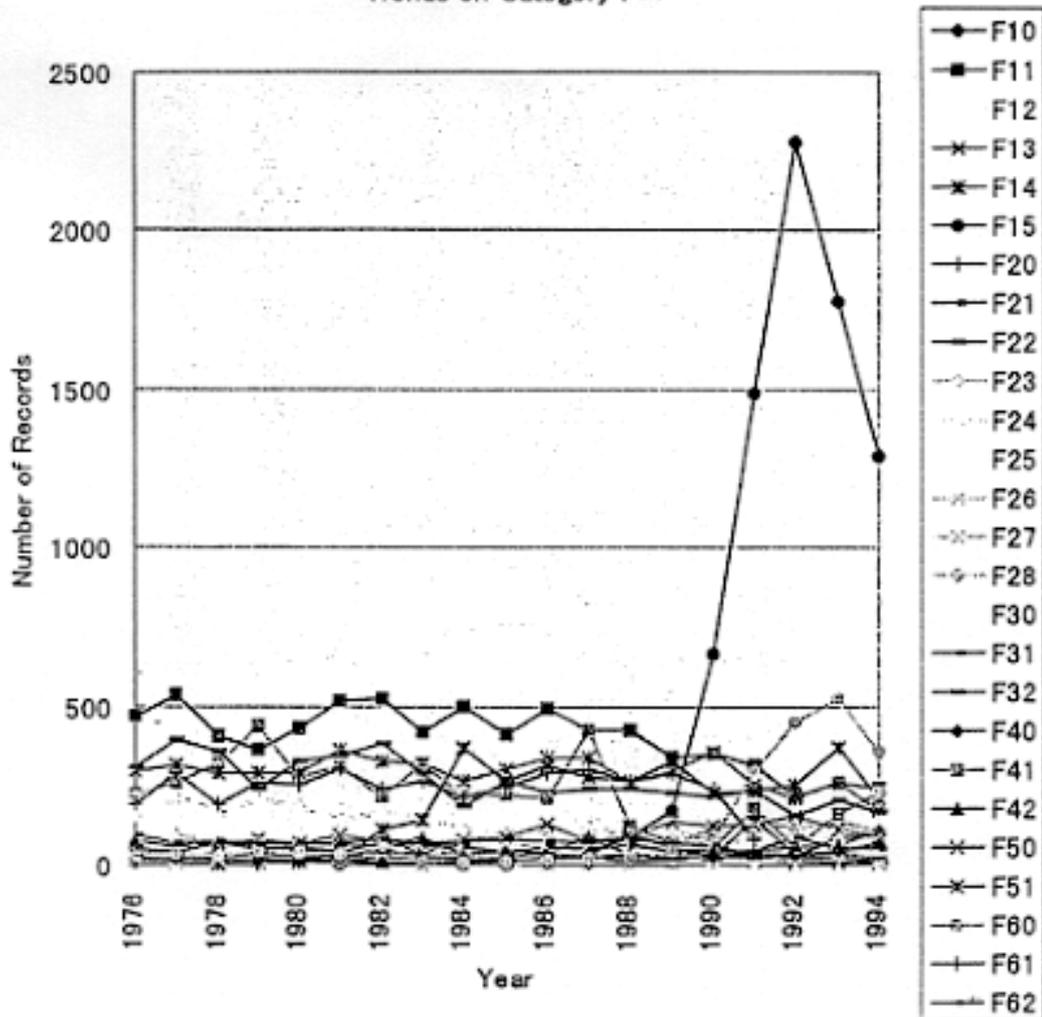


図 1.3.17 小分類 F10-E62 の推移

- F1* : 経済性と社会学、
- F2* : 法律、
- F3* : 原子力ドキュメンテーション、
- F4* : 保障措置と査察、
- F5* : 数学的方法と計算コード、
- F6* : その他

原子力研究初期のころの INIS 文献は、要素技術に関する研究論文が主であるが、日本からは特許情報が、欧米からはエネルギー経済環境など長期的な視点での論文が散見される。

1.2.2 原子力技術の波及効果

科学技術の進展を（１）萌芽段階、（２）実証段階、（３）実用化（商用化）段階：改良標準化、（４）社会化段階、（５）発酵段階：文化、文明の形成の５段階で考えて見た場合、科学技術史のエピソードをライフサイクルにあわせて類型化することができる。優れた回顧録や科学史関連の著書の多くは、主として萌芽段階に関するものであるが、好個の対象としてそこに述べられている科学技術の“Great Personsによる旧きよき時代”の伝統と手法が、情報化社会の下での科学技術の先端化とダウンサイジングが急速に進みつつある将来に、そのまま有効に機能するかどうかは明らかでない。

萌芽段階は、いわゆる発想、仮説形成（abduction）が重要となる段階で、原子力分野においては、今回主な調査対象とした INIS データベース収録文献以前のデータベースの先史時代に相当する。Serendipity という言葉で象徴される段階であるが、多くの場合、関連諸分野の充実と他分野からの新たな視点や概念の導入が真のブレイクスルーへのダイナミズムを生んでいる。

前述の Standard Reference には、この段階に相当する文献が多いが、研究者の資質、ねばり、情報環境、偶然、その他の要因が重なって達成されたもので、そうしたブレイクスルーを喚起するための条件については明らかではない。萌芽段階の特徴は、個人のセンスとともにトリガーとなる時代、作業環境の中での

- ブレインストーミング、発想、概念形成、プロトタイプを試作、簡易モデルによる試算、範例の見直しや再設計、
 - 領域融合、試行錯誤と結果の適切な評価・選択・意思決定
- などである。

ネットワーク、データベース、スーパーコンピュータなどに代表される情報環境の下では、旧来型のブレイクスルーが達成された時代、作業環境とは異質の条件が準備されつつあり、基礎研究、基盤研究の推進方策についても萌芽段階からの発想の転換を必要としよう。

添付資料に、Serendipity や萌芽段階の研究開発に関係する著作を例示するが、大切なことは、過去の成功事例で有効だった方法論をそのまま踏襲するのではなく、新たな情報環境、実験環境の構築を前提に、次のブレイクスルーへの挑戦を企画、実践することであろう。そして、それは、メタレベルの仮説形成、選択、実践、評価の科学、とでも言うべきものである。

今井賢一らによれば、イノベーションは以下のように組織内部のダイナミズムと外部との刺激的な相互作用の結果である。

「イノベーションは不確実性の中で模索から生み出されるものであり、イノベーションを求める研究開発の過程においては、要素技術の間の思いがけぬ連結や他の領域との接触による意外な情報が重要視される。したがって、どのような組織がイノベーションをうみだしうるかという問題は、本質的な点で不確実性に対応できる組織はどのようなものかを考察することほかならない。

現代の研究開発は、巨大な投資を要する長期の組織的な努力であるから、それを継続的に遂行していくためには、企業や研究所のしっかりした内部組織が不可欠である。研究開発のインセンティブを確保するためには、情報の内部処理が必要であり、(中略)、同時に、その内部組織は、大学や外部の研究機関などとの連携や、情報交換のための幅広いネットワークを重視しなければならない。」(今井賢一編著:イノベーションと組織より)

この意味で原子力研究を単なる核エネルギー利用のための工学としてではなく核レベルから環境、地球、さらには宇宙レベルまでの様々な視点を含意した総合工学・科学としてとらえるべきであり、他分野への展開も期待できる萌芽的なアイデアの宝庫と考えるべきで、そこでは将来展開への素材を活かす“経営的センス”が極めて重要である。

INIS データベースの収録文献の多くは1970年代から現在までのもので、原子力に関しては以下に示す実証段階から社会的受容に至る過程に相当するものである。論文誌、報告、予稿集、本、特許等、情報源の形態も様々である。現在のINISでの収録は無いが、新聞、テレビ等のマスメディアに加えて、最近ではWWWやデータベースによる情報流通が盛んになっており、社会的受容には大きな影響を与えている。

出現頻度の高いキーワードは、参考資料(Keywords top 100, Descriptor top 100など)に示すように、元素、原子のような普遍性の高いものであり、関連分野は特定するデスクリプターは原子炉、加速器などの人工物である。物理、材料関連の論文を介して酸化物高温超伝導材料のインパクトはキーワードの出現頻度としても明確に現れている。

(2) 実証段階、(3) 実用化(商用化)段階の活動に関しては、レポートの形での報告も多いが、そうした情報としてよりは原子炉、加速器、放射線などの“実体”そのものとして具現され、量子ビーム源、電力などの便益を生み出している。

(4) 社会化段階および(5) 発酵段階に関しては、文献以外にマスメディアの果たす役割が極めて大きい。学問あるいは/また文化の創生、文明の形成への長時日の道程の途上にあると考えるべきであろう。鉄鋼業のように数千年の歴史を経ると実利的な点でも文化としても発酵は進んでくる。核に関する科学技術は、内容的には組み尽くせない意味(semantics)を有しながらも文化としての浸透はこれからという段階にある。

宇宙航空産業、コンピュータ産業は、原子力産業とともに今世紀を代表する産業であるが、前二者が米国を中心に厳しい国際競争、市場競争の下にあり、不断の過激ともいえる進化発展の過程にあるのに比べて、原子力産業は先端科学技術というよりは基盤技術としての重みを増しつつあり、科学技術として次の世代を魅惑し続ける新しい展望を示すことには必ずしも成功していない。

原子力の科学技術の関連する分野としては、参考資料に示すようにA(G)~Fの様々な分野に広がっている。しかしながら原子力技術の固有の研究開発から生まれ、それが他分野を支えるキーテクノロジーとして明示的に波及効果として認識された例は少ない。この点に関しては原子力分野の研究者の今後課せられた責務は大きい。

2. 原子力関連研究の現状と動向に関する調査

2.1 科学技術分野の中での原子力の役割

キーワード、デスクリプタから見た原子力分野の特徴は、原子炉、加速器、放射線源などのエネルギー・量子ビーム利用のためのインフラ（以下、原子力インフラ）を中心として極めて多くの領域に広がった科学技術である。そうした原子力インフラを研究開発面で支える大学、国立研究所、民間研究所等の組織は、国内外の優れた研究者が集まる魅力的な COE であることが重要で、そうした組織の原子力研究インフラの整備、運営にあたっては以下の点を考慮する必要がある。（1）原子力研究インフラの計画、運営が重要課題の解決や最先端の研究を可能にするものであること。重要課題の抽出にあたっては、原子力長期計画等で提示された長期的な視点を理解し、また研究開発の現場からの緊急課題に即応した対応ができることが大切で、状況の変化に対するフットワークと長期的な試練に耐えうる足腰、精神力が求められよう。一方、研究として国際的に高い評価を得るためには、原子力研究インフラがエネルギー、精度、フラックス、運転モード、計測制御系あるいは利用できる粒子に関して世界初めてという性能をもたなければならない。

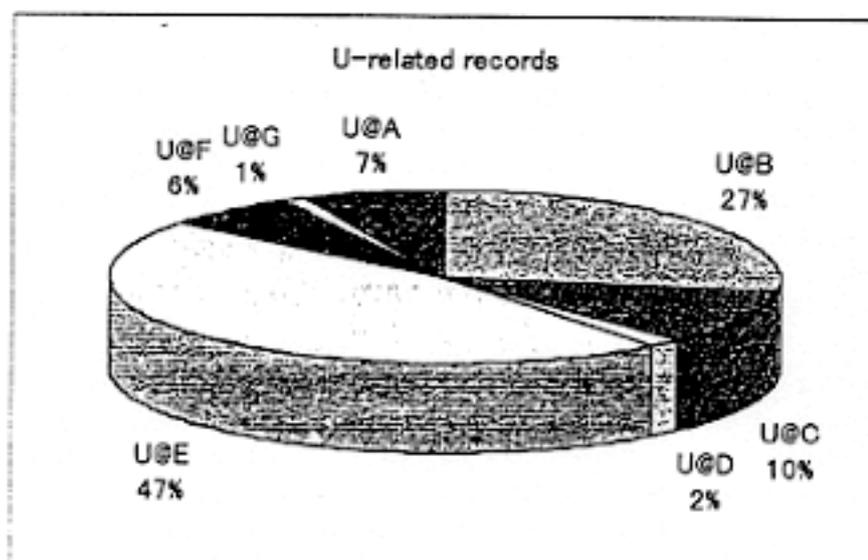
（2）原子力研究インフラが優れた研究者、技術者を擁していること。最先端の研究活動を維持して内外の優れた研究者を惹き付けるには、原子炉、加速器の性能向上や新しい測定器の開発が継続的に行われていることが必要である。それには問題提起型の研究者が施設に密着して研究活動を行い、独創的な研究を行なうことが大切である。（3）柔軟で流動性の高い研究制度の整備と人材確保。日本の原子力平和利用研究の初期においては、強力なリーダーシップと多分野の優れた研究者、技術者の交流があった。新たな研究開発課題が次々と現われ、果敢な挑戦があった。そうした不断的努力の蓄積が原子力の実用化に大きな役割を果たしたが、その一方で制度化された専門家集団を生み、“Big Thinking”が生まれにくくなっているのも事実である。それは、キーワードやデスクリプターに新しい分野固有の語彙が出てきてないことにも現れている。研究開発の現場のニーズをインセンティブに課題を深掘りする研究者、技術者の勇気付けと、新たな視点を導入する柔軟な人材の参加とが求められていると言えよう。そのためには、上記視点を考慮しての（4）省庁の壁を越えて研究者が建設、利用に参加できる体制の整備、（5）国際的な共同利用を可能にする施設と体制の整備、（6）責任ある課題採択制度及び成果の評価制度の確立、などが必要であろう。

研究分野としては極めて広大な分野にまたがっており、幾つもの COE の形成が期待できる。社会的な状況が必ずしも追い風ではない今こそ、時代を切り拓く積極果敢な新しい提案が求められていると言えよう。

2.2. 原子力関連科学技術の将来

原子力研究の波及効果を計測するための間接的情報として、他分野とのコミュニケーションの状況を個々の論文の専門性と一般性・普遍性の観点から検討した。詳細は、添付の参考資料から明らかで、原子力関連の論文が、他分野に比較して、極めて広い分野との連携で成り立っている点である。事実、科学技術分野における計算機利用の最大ユーザーは1960年前後から原子力分野であり、計算科学、計算工学は原子力分野から始まった。材料の高純度化に関するプロセス技術、物質科学の進展、格子欠陥論、安全工学、システム工学、流体工学、水化学、計測技術、廃棄物処理に関連しての環境科学等々、多分野の学問体系の精緻化に大きく寄与している。

分野の広がりを示す代表例として下図を示す。下図はウランをキーワード、デスクリプタに含む論文の分野別統計である。工学 (=U@E)、材料、化学 (=U@B) が主であるが、広く物理 (=U@A, G)、生命科学 (=U@C)、その他 (U@D、U@Fは、同位体、非核エネルギー) に多面的な関わりを示しており、詳細には立ち入らないが、複雑系の科学、「電子系、欠陥制御、傾斜ポテンシャル等々の“先端”科学技術の芽だけではない“選択と統合と中庸”のなかで創り出される“用の美” (使い易くすることと美しいことが一致していた)、人間と設計、人間社会と技術との相互作用などの新しい展開を垣間見ることができる。



Ⅲ. まとめ

調査にあたっては恣意的な結論を避けるため、一般的な歴史認識、事実あるいは先入観と、個々の統計データの意味について明示的に区別して記載することを試みた。

- a) 極めてあたりまえのことであるが、一般的には、誰しもが“break through”と認めるような innovative な仕事は予想外の結果であり、計画的に達成されるものではない。しかしながら巨視的にみれば、そうした“break through”の発生する場では適切なレベルの予算、人員、インフラ、時間と自由が“計画的に”手当てされ、また市場、生存あるいは功名心などをかけた競争や知的好奇心など広い意味での進化の原動力となるインセンティブが存在し、そのことが“核”になる人材の育成や日常的な人の交流と情報の発生を活性化し、そうした環境の中で機が熟すのを待っているかのように偶発的に、しかしながらある種の必然性をもって“break through”が達成される。そこでは、“break through”を引き起こすための孵化に必要な時間、組織・体制の整備と維持が必要で、そうした“break through”が引き金となって関連の基礎研究を小波のように活性化し、そうした小波の重なりが科学技術基盤を徐々にかつ着実に変革し、結果的に社会に認知される変化となる。
- b) 文献データベースに含意された意味 (semantics) は、そうした小波の統計であり、それは科学技術分野の成果の記録の統計である。本調査は、原子力の広範な分野を対象としている代表的文献データベースである INIS (International Nuclear Information System) を活用して、研究動向の断面を素描したもので、世界各国の原子力分野の情報専門家が原子力分野に関係するものと考えられる文献を予算、マンパワーの許す範囲で収録したものを基台にしている。したがって、他分野の萌芽的な研究を直接的に INIS の中で発見することは希であろうこと、また INIS 収録文献の中から他分野も含めた将来の“break through”につながる萌芽的な研究を見つけることも容易でないため、個々の研究の波及効果についての評価、位置づけについては、立場を明らかにした上での整理を必要とした。そのための参考資料として、過去の範例に相当する研究成果について SCI を活用した SR の引用データと引用状況についての解釈を添付した。引用件数の統計に関しては、研究分野あるいは個々の研究内容により大きな差異がある。加速器や高温超伝導材料の事例で例示されるように、優れた成果が突然達成され、関連の科学技術者集団の間であつという間に認められて普通名詞化されてしまう研究や、材料の照射損傷の素過程モデリングのように、文字どおり standard reference として長い間引用され続ける文献もある。繰り返しになるが、いずれにしても先駆的な研究成果を生み出す土壌は日常的な基礎研究支援の体制のなかで育成されるものであった。
- c) 今回の調査方法の限界としては次のような問題点がある。例えば加速器技術に関連しては、重要なレポートが内部資料としてだされる場合や、ロシアの論文が勝手に訳出されるなど、Citation Index では調べるのが難しい。また重要な文献ほど、その分野の常識となってわざわざ引用することはしなくなったり、SCI はある分野の力学、Scientific

Community の形態や常識を表わすので、これらが固定化した際の動向は見やすいが、社会的価値などと外れてしまう。

d) 一方、原子力発電プラントのように大規模かつ複雑な工学システムの実用化には、その完成に至るまでには“break through”の達成に比較してはるかに多大な人、資本、時間の投入と、粘り強く全体を調整してゆくための組織が重要であり、こうした研究開発の実作業や成果を論文、レポート数によってのみ計測することはできない。それは、次のイノベーションのためのインフラとして、あるいは社会との相互作用の中で様々な便益や負荷を生み出す実体として計測されるべきである。

また、一人の専門家としての人間が、参考資料に示されたような膨大な領域が対象となる人工物を理解し掌握することはほとんど不可能であるため、個々の“人間”の不完全性と専門家集団の能力・役割を陽表的に意識して、大規模かつ複雑な工学システムのエンジニアリングを行うことが極めて重要である。こうした視点をその体系に取り入れた工学の確立が要請されているが、こうした新しい方向に関しては、先端分野にのみ目をむけるのではなく、産業現場、教育現場の生々しいニーズを抽出するしくみが必要となろう。このことは、科学技術政策の立案にあたって、旧来の工学的／理学的、基礎／応用といった分け方だけではなく、“人間”あるいは“社会”を明確に意識した学問が重要であることを示している。教育に関連しては、次世代の教育が夢の創生という観点から積極的に推進されることが望ましい。その意味でも教育機関への今まで以上の支援が重要である。INISの170万件の成果も教育機関による体系化の努力無しに次世代が受け入れる望みはない。

大規模プロジェクトに関係する関連分野の数は多い。このことは統計にも明かである。直接的な引用には現れない形での波及効果は大きい。従って多数の分野の統合する試みは、人工物の研究開発や大規模プロジェクトを介してなされることが多い。しかしながら、そのための学問体系が顕在化することは少なく、それぞれの成果物としての人工物の中に合意されることが多い。成果の継承、再利用は、一連の研究開発プロジェクトの遂行を通して総合的に達成されてきたがそうしたプロジェクトが減少してしまった今、これまで非明示的な形でしか存在しなかった知的資源を再利用・再構築可能な知識として顕在化する必要がある。

そのためには、属人的な知識、ノウハウを有機的に統合し、“作品”の製造を通して継承発展させていくようなメカニズムが必要で、ハードウェアとしてのプロジェクトの実行が困難な今、より大きな自由度を持った仮想環境下での知識の体系化を必要としよう。このことは、個別学問分野の領域化、多様性の増大の中、モノづくりのための基盤的な科学技術が個々の研究者、技術者の研究実績の蓄積という点で、大きな困難に直面している現実を正視する必要があるだろう。換言すれば、先端科学の多様化の中で、モノづくりの基盤となる根幹の科学技術が軽視され始めたところに多くの問題があり、これは産業そのものの空洞化となって現れつつあることに、裏退への予兆がある。

希望は、膨大な成果の中に隠された次のブレークスルーを引き起こすための素材であり、それらは次世代の研究者の深掘りによって大きく展開する可能性を多々秘めている。世界的な歴史の流れの中で科学技術を眺めれば、これまで、原子力に限らず、ロボット、宇宙・航空、通信、コンピュータ、画像処理、材料、インターネット、環境シミュレーション等々、先端的と考えられる科学技術のほとんどで、その初期には極めて組織的な軍事研究による基盤の形成があったことがわかる。今回の調査の中で、そういった側面を場に取り上げることはしなかったが、近年の情報技術の過激ともいえる普及により、かつての深淵な学問体系や極秘の科学技術もモジュール化・ツール化され急速に透明度や操作性を増しつつあり、研究開発の進め方も変化しつつある。その結果、基礎研究においては、若い世代や他分野などの新しい視点をもった人材の参入が以前に比べれば極めて容易になっており、これからは、そういった非組織的な人々の創意、価値観に基づく研究提案を実践的に進化させてゆくためのやわらかい組織・体制の形成とインフラの整備が必要である。原子力研究は極めて厳しい社会状況の中にあるが、基礎研究においては、これまで築き上げたコンテンツを軽視することなく上手に活用して将来につながる新たな人材を継続的に獲得するとともに、基礎研究においては重要課題への挑戦を通して、幾多の困難を克服して新たな可能性を拓くという真のセレンディビティーを実現するスピリットを維持し続けることが関係者の責務でもある。

添付資料

1. INIS解析結果
項目別統計、分野間相関
2. Standard Referencesについての解析結果
3. 参照データ
4. 参考文献

(以降省略)

全文ご希望の方は、事務局へお問い合わせ下さい。