

長期計画策定会議第四分科会報告書

(ドラフト#2：平成12年5月5日)

1. はじめに

21世紀には、理工学・医学・生物学・農学などの科学技術^{*}をはじめ、哲学・心理学・美学・政治経済学・歴史学などの哲学・人文・社会学、そしてさらには広く芸術も含めて、これら学術の知・情・意に亘る深い融合が進むものと期待される。その新たな地平の中で、原子力も、まさにその特質である学術の総合と融合をここ半世紀に及んで進め、その基盤の上に自らの未来を描き、さらなる飛躍を遂げようとしている。

原子力は、人類がミクロ世界を発見し理解し、そしてその応用を通じて恩恵を享受していく中で、単にエネルギーや放射線の直接的利用に留まらず、関連の先端科学技術はもとより高度な製品やシステムをも生み出してきた。また同時に、安全・閉じ込め・リサイクルなどの文化的視点をリードしてきた。原子力は、優れて時代をリードする「文化」でもあった。

このような広領域で長期的な視野に広がる原子力の中で、第四分科会は、主として先端科学技術に関わる主題に絞って、未踏領域への挑戦と持続可能な発展の視野の中に大きな位置を占める諸分野について検討し、あわせて、これらの先端科学技術の研究開発の進め方や評価についても検討を進め、提言を取りまとめた。

1.1 先端科学技術としての原子力

原子力とは、原子核の分裂や融合といった原子核変換によって発生するエネルギーを指す。原子力は「物質の究極の構成要素は何か」を探る人類の知的活動の中で発見されたものであり、その主要な実験手段である加速器技術は今でも原子力研究開発の基盤技術になっている。また、原子力はエネルギー源として注目され、今日までに原子力発電として実用化されてきた。さらに、原子力は、自然の構成要素や法則を探るという人類の知的活動としての側面から、核変換を通じてエネルギーを取り出す実用化技術という側面に亘る幅広い総合的科学技術でもある。

このように、原子力が人類にもたらす豊かさは、直接的にエネルギー利用を通じて人類に豊かさを与えるのみならず、知る事（自然認識）のもたらす豊かさを人類社会に与えてきた。すなわち、原子力の開発では、エネルギー利用開発に歩調を合わせ、先端科学技術としての発展が相俟ってきた。「エネルギー利用」と「先端科学技術」は車の両輪のごとく原子力を支える基盤であり、この両者は今後も原子力長期計画を

^{*}ここで、「科学技術」は「科学と技術」の意味で使うが、双方は完全に切り分けられるものではなく、大きな融合領域を有するものとして定義する。

支える基盤となろう。すなわち、エネルギー利用を主眼とした実用技術や原子力を支えてきた基礎学術、さらには、現代社会を支える数々の先端科学技術を生み出す総合科学技術として、原子力は一段と強力に推進されなければならない。

本分科会は、「21 世紀の社会を支える科学技術の創出」を目指して、推進すべき原子力の研究開発とは何か、また、その効率的な推進方策はどうあるべきかを検討した。とくに基礎的研究開発に重点を置いて、原子力による未来技術の開拓と持続可能な発展をいかに進めるかを検討した。

1 2 なぜ先端科学技術の開発を行うのか

このように、原子力がもたらしうる豊かさを実現するためには、先端科学技術を振興することが重要である。先端科学技術は次のような観点で重要であろう。

- (1) 人類の知の地平を切り開き、人類の知的財産を増大する（知的欲求の充足）
- (2) 新たな産業技術に資する知見を提供する（賤的価値の生産）
- (3) 人間福祉・安全等人間生活の質的向上に資する（健康や生命の保全）
- (4) 若人に夢を与え健全な世界の発展に資する（夢を贈る）

高度に発達した科学・技術に強く依存している現代社会では、高い研究開発力と優れた技術的能力を持つ国のみが主導的な役割を果たすことができる。ここでいう技術的能力は、ハード／ソフトウェアの高度な開発・製造技術、信頼性の高い生産技術を意味するだけでなく、その成果を柔軟に受け入れて使いこなす社会的能力も含んでいる。我が国では資源が乏しい上に狭い国土に多くの人々が生活している。この国を豊かで「安心・安全な生活ができる国」にするためには、優れた研究開発力と技術的能力で多くの成果をあげるとともに、広く世界に開放して信頼と尊敬を勝ち得ることが大切である。

原子力基盤技術に立脚した先端的研究開発では、わが国はこれまで欧米先進国を追従するキャッチアップ型をとり、「効率的な 2 番手」の位置を占めてきた。先端的研究施設の建設に当たっては、多くの場合欧米で開発された技術を比較検討し、最も効率的で高性能のモデルを構築し建設してきた。しかし現在では、我が国は加速器、高温プラズマ発生装置や高出力レーザーのそれぞれで世界のトップグループに属する研究施設を建設しており、既にあるものは世界最高性能を実現している。従って今後は、先行するモデルのない先端研究施設を自らの手で開発し、未踏領域での研究開発に用いることになる。21 世紀のわが国で、未来を切り拓く新しい領域に挑戦し成果を挙げるためには、独創的な発想による研究を世界最先端の装置で行うという仕組みを確立しなければならない。現在の日本にとって最も必要なことは、国として推進する基礎的科学技術研究開発の方向を「未踏領域への挑戦」に定め、できるだけ多くの研究資源を集中することである。

本分科会は、原子力分野の基盤的研究推進の指針を「未踏領域への挑戦」とし、高エネルギー放射線の利用に重点を置いて研究に必要な施設として加速器およびレーザーを選び、その推進に当たって考慮すべき条件を検討した。また、社会的要請の強い次世代エネルギー生産技術として、核融合と原子炉の技術革新、さらに高密度放射線のバルク照射が特徴である研究用原子炉を取り上げ同様の検討を行った。

1 3 原子力と基礎科学

現代科学は19世紀末のX線、放射能の発見と20世紀初めの量子論の誕生で始まった。1910年代に、原子核とそれを取りまく電子からなる原子の構造が明らかになると、科学者の関心は原子核に集まった。30年代には加速器や新しい検出器が発明され、原子核研究の実験手法が急速に進歩した。中性子の発見、原子核反応による人工的な原子核変換の成功やウラン核分裂の発見などが相続き、陽子と中性子から成る原子核の構造とその動的変化（原子核の励起、反応、壊変）を解明する理論的、実験的研究が急速に進歩した。1930年代後半には中間子が発見され、科学者の関心を原子核より小さい素粒子の研究へと駆り立てた。高性能の高エネルギー加速器が開発され、原子核よりさらに小さい素粒子の研究に使われてるとともに、高エネルギー放射線の利用という新しい分野を拓くのに用いられてきた。

1940年代初めに核分裂連鎖反応持続実験が成功し、原子炉開発が始まった。その後エネルギー生産を目的とした原子炉の開発が進み、今日ではわが国の原子力発電の電力は総発電量の34%に達している。一方ウランの核分裂反応だけでなく、軽い原子核の融合反応でもエネルギー生産が可能なが明らかになって核融合研究が始まった。その後、磁気閉じ込め高温プラズマ発生装置の開発が進められ、また最近では、高出力レーザーが高温プラズマ発生技術として注目されている。なお後者は高エネルギー放射線発生の新技術としても関心を集めている。

一方、物質中の原子配列と様々な物質特性の生じる理由も研究対象になり、物質科学という研究分野が生まれてきた。その研究手段として最も重要な役割を果たしたのがX線である。その後、加速器で得られる多様な高エネルギー放射線、例えばイオン、重イオン、放射光や中性子、ミュオンも物質研究の新手段として使われるようになり、また、原子炉で生成された中性子も先端的研究手段として使われている。このほかX線や加速器による高エネルギー放射線は、診断やガン治療など医学研究や医療の現場で利用され、また、イオン注入や物質改質、欠陥探査、公害物質除去など工業的にも活発に利用されている。

以上のような、これまでに研究手段として開発されてきた高エネルギー放射線の利用技術や加速器・研究用原子炉・核融合研究装置は、関連する諸装置も含めて原子力研究開発の途上で生み出されてきた技術であり、原子力の研究開発に欠かせない重要技術となっている。これからも明らかなように、本報告書に含まれる多彩な先端的科学技術研究は、すべて原子力という大きな体系の中核となり、また裾野を形成する基

盤的なものであろう。

以上をまとめると、基礎科学との繋がりにおいて、以下の諸点が重要であろう。

(1) 物質の根源を理解する (物質)

(2) 物質そのものの創製とその性質・機能の理解を進めること (情報)、および、それらの知的及び物質的情報をもとに人間生活に寄与する新しい利用法の開拓

(3) それらの集大成の一つとしてのエネルギー生産の新方法、新システム、および高度計算科学などの新技術の開発 (技術、エネルギー)

このような諸点を勘案した。

1 4 世界が必要とする日本の原子力技術

20 世紀のわが国の歩みを振り返ると、前半は明治維新で一新したわが国の近代化、後半は第二次世界大戦で荒廃したわが国の復興としてまとめることができる。前半には欧米文明の導入に努め、後半にはアメリカを中心とした先進国から先端的科学技術を導入して、社会・経済的には効率的な発展を成し遂げることができた。わが国の科学技術も 20 世紀後半にはめざましい発展を遂げ、一部の分野では世界の最先端に位置するまでになっている。しかし、「キャッチアップ (追いつけ追い越せ) の時代」と特徴づけることができるこの時代に、わが国が独創性を発揮したのは、欧米で行われた科学的発見あるいは技術的発明を実用技術として工業化し効率的な生産方式を確立する分野であった。このことは日本経済の飛躍的発展をもたらしたが、世界のフロントランナーとして生きる日本にとって学ぶべき先例にはなり得ない。

わが国が次の時代に「国際競争力のある国」として存在できる条件は、基礎的科学技術分野で独創的な成果をあげ、革新的な技術を創出する力をもつことであろう。そのためには「誰もやったことがない未踏領域へ挑戦」をわが国の科学技術研究開発の指導原則にすることが重要である。特に原子力科学技術に関しては、我が国は欧米各国に比べても高い水準にあり、世界に向けて原子力に関する科学・技術を発信していくことは我が国の責務である。

世界に発信するためには、基礎研究と開発研究の高揚が基本的に大事である。世界のどこかで発見・開発された原理や方法を、その後の発展性をみてから実施しようとする方策は、21 世紀の国際社会の中で日本が演じるべきではない。これまでの日本は、原理や新しい現象の発見には重きを置かず、既存の原理に基づいた実用化までの技術開発や、実用化面での社会への浸透・効率化・性能向上・安全性向上などの技術発展に重きを置いていた。そのため世界を変える科学技術という面では立ち後れてきた。またそのことは、経済の新しい発展基盤を自らの手で作り得なかったことにもつながる。したがって、今後は基礎研究と開発研究育成にことさらに力点を置くべきである。

当然のことながら、基礎研究、開発研究と技術、利用技術は常に一体のものであり、

どれ一つがかけてもバランスのとれた発展は望めないことも事実であり、これまでに日本が重きを置いてきた技術開発を続けることも一方では重要であることも指摘しておきたい。

基礎研究や開発研究の育成には、チャレンジ精神の高揚が重要である。チャレンジを忘れた国民には現在の繁栄を維持する事も不可能である。チャレンジする姿勢が原子力の原点であったことを認識し、「世界に発信できる日本の原子力科学技術」を標語に進めていくべきであろう。そして尊厳を持ち文化をリードできる事、それが国際貢献ともなる。

1 5 夢一杯の科学技術

例として、原子力にもっとも近い原子核物理学を考えよう。宇宙を作っている元素の質量の99.97%は原子核である。20世紀の初めに放射線の発見を契機として原子核が発見されて以来、基礎科学では量子力学の発見、応用では原子力エネルギーの生成など、原子核を基礎とした研究や応用が、20世紀の人類社会の発展に大きく寄与してきた。

少し見方を変えて、大きいものから物質をならべてゆくと、種々の階層に分かれる。その階層は、宇宙 銀河 恒星 生物・物質・人間 分子・原子 原子核 素粒子 クォーク・レプトンである。原子核は人間の階層に比較的近く、人の生活への応用が可能なるものである。エネルギー生産、医療、放射線利用など我々の生活に深く入り込んでいる。一方、原子核は素粒子やクォークなどより深い階層とも深くつながっており、量子論や相対論の検証の場として使われてきた。また興味あることに、宇宙での営みのもっとも普通の姿である、恒星が誕生し、進化し、そして爆発する過程はほとんどが原子核反応によるものである。

このように、原子核に根ざした科学や技術は、生活からの研究まで種々の場で欠くことのできないものであり、今後の社会の発展にも重要な役割が期待される。

このよう重要な原子核は、宇宙の進化と共に作られてきたと考えられている。しかし、原子核が、いつ、どこで、どのように、作られたのかは未だに解明されていない。これを解明するには、原子核の性質、その反応の仕方、等々を詳細に研究する必要がある。またこのような研究は原子炉からの放射線性廃棄物の処理法や、新しいエネルギー生産法の開拓にもつながる情報をもたらす。このように原子核研究は、来世紀の大きな科学の目標の一つといえよう。

もちろん、他の例もある。X線天文衛星による観測結果は、人類の宇宙に対する新たな認識を提供する。そこで利用される高分解能の新たなX線検出器の開発はこのような夢を広げるのに大きな役割を果たす。また、中性子や放射光を利用し生命科学の研究などは人類のフロンティアである脳研究に資するところも大きい。

2. 未踏領域への挑戦

2-1 科学技術の継承と新しい科学技術への挑戦

わが国では原子力研究というと原子炉を中心とする実用的なエネルギー開発の側面が強調されがちであるが、国際的には加速器で得られる高エネルギー放射線や高出力レーザー光による原子核・素粒子物理から物質科学、生命科学に亘る広い科学技術分野の基礎的、応用的研究開発も重視されている。原子力は単なる実用的エネルギー生産技術としてだけでなく、現代社会を支える先端的科学技術を生み出す母胎となる総合的科学技術として推進されなければならない。

加速器など基礎的研究開発に用いられる最先端の装置は未踏の研究領域を開拓するツールであり、これまでにない能力や他を超える性能を持っていなければならない。従ってその建設に当たっては、新技術開発や新素材利用など従前の技術を越える努力を重ね、また、新しいアイデアに基づく試みに挑むことが不可欠である。そのため最先端加速器の建設によって、革新的技術が実用化されてくる。例えば、大容量空間の超高真空、大型超伝導磁石、超伝導キャビティ、高周波大電力回路などのハードウェア技術や、電場磁場分布の3次元解析などのシミュレーション計算、大容量超高速計算、計算機制御や大量データ処理などソフトウェアを含む計算機技術が、高エネルギー加速器の建設と利用によって開発され実用化されてきた。これらの中には、超伝導技術のように、実験室レベルでは成功していた新技術の芽を実用化し開花させたものも含まれている。

一方、加速器などの先端装置を用いて行う物質の構造解析、特性評価、新物質合成や加工あるいはイメージングは、物質科学・生命科学研究の主要な研究手法である。最近、高出力レーザーが核融合研究やX線レーザーの研究開発に用いられるようになり、新しい原子力技術として注目されるようになった。現在では多様な加速器が開発されて、広い先端科学技術分野の研究開発で重要な役割を果たしている。

高出力レーザーや加速器を利用する科学技術研究開発の特徴は、実験研究の主要装置が最先端技術の進歩によって発展し、その研究成果から新技術の芽が育ってくるというテクノロジープッシュ（技術主導）型あるいはシーズ開拓型の研究開発ということである。基礎科学の分野ではこの型の計画が主流である。

これに反して革新的エネルギー生産技術の開発のように、早急に実現しなければならない社会的要請の強い研究開発課題もある。このようなデマンドプル（目的指向）型あるいはニーズ先行型の研究開発も原子力研究では必要になる。

したがって、次節では「未踏領域への挑戦」として加速器および強力レーザー施設について述べる。また、次々節では「持続可能な発展」として次世代エネルギー生産技術としての核融合と原子炉の技術革新、そして研究用原子炉を取り上げる。

2 2 未踏領域への挑戦

原子力の先端科学技術では、光、荷電粒子、中性粒子源の開発等により、新たな研究の展開が可能となってきた。21世紀は、これらを用いて、物質・エネルギーとは何かを「極め」、新しい物質を「創り」、ヒトのDNAやタンパク質の構造を「見る」ことを可能にするといった最先端の科学技術の一つとして、我が国の知的フロンティアの開拓に貢献すると期待される。

現代科学技術における研究開発の目標は「自然の理解」と「社会を支える新技術の開発」の2点に集約することができる。前者は人類の知的好奇心に基づく純粋な学術研究の指向するところであり、後者は人類生存に向けた成果の還元である。一方、人類の知的活動を「見る、究める、創る」の総合として考えると、この立場からはいえ、前者は「究める」活動の、後者は「創る」活動の終着点であり、その間に様々な「究める、見る、創る」活動が存在している。基礎研究は「見」て「究」める知的活動であり、新技術の開発は、「究」め「見」た結果から、もの「創」りに進む知的活動である。高エネルギー放射線の利用は「見」る道具に最もよく使われている手法である。

実際の科学技術研究開発は、この2点間に分布する具体的な目標によって、純粋基礎研究、基礎研究、応用研究、実用化研究に大別することができる。その研究に必要な放射線利用装置には、それぞれの目標に合った性能の装置でなければならない。例えば加速器では、純粋基礎研究を指向した高性能加速器、幅広い研究に用いられる多目的加速器、特定の目的に特化した専用化した実用加速器が開発されており、しかも放射光、イオン、中性子など特定の放射線の発生に最適化した加速器になっている。しかし、これらの施設を全て国費で建設する必要はない。未踏領域への挑戦に向けた戦略を立て、それに従って計画を評価することが肝要である。

この様な先端科学技術の事例として、加速器よりの放射光・中性子・荷電粒子、さらには、強力レーザー光が切り拓く科学を取り上げ、研究開発の意義、現状、将来展望の分析を行なった。

2-2-1 加速器が生み出す光や粒子

加速器の開発及びそれを用いた原子核・素粒子の研究は、歴史的に見て「原子力開発の基礎」となる重要な基礎研究であり、今日でもその性格は失われていない。原子核・素粒子の基礎研究から得られた新事実や先端技術が「原子力開発」に新しい展開をもたらしただけでなく、逆に「原子力開発」で生まれた技術が加速器を利用する研究に大きく貢献してきた。

加速器は極めて初期の段階から放射性同位元素の生成や放射線損傷の研究にも応用されてきた。したがって今日「加速器科学」と総称されている分野の基礎的・応用的研究や実用的な加速器の利用は原子力基礎科学の重要な一端を担っている。

加速器は1919年ラザフォードの原子核の発見を契機としてコッククロフト・ワ

ルトン型や、サイクロトロンが発明され基礎物理学の発展を促すと共に、アイソトープ利用など重要な応用を開いてきた。加速される粒子では電子、陽子、重イオンと広がり、加速エネルギー、ビーム強度、ビームの性質の改良が進められてきた。

最近の加速器の発展は、そのような天然に存在する荷電粒子の加速にとどまらず、それらの粒子の反応により作られるいわゆる二次粒子の利用に広がりつつある。中性子ビーム、ミュオンビーム、放射光、RI ビームなどである。このように加速器による研究や応用は加速粒子の利用法の拡大のみにとどまらず、新種の粒子の利用という新しい扉をも開きつつ発展している。(図：加速器の発展)

現在の加速器科学をまとめると、図 Fields of Accelerator Science のようになる。利用する粒子としては、光、荷電粒子、中性粒子と大きく分類されるが、その各々はさらに以下のように細分化される：

光： 放射光、レーザー

荷電粒子：重イオン、RI ビーム、陽子、反陽子、K 中間子、パイオン、ミュオン、電子

中性粒子：中性子、中性中間子、ニュートリノ

これらの加速粒子を使った研究や技術開発は多い。以下にそれらの粒子を用いた科学の意義・研究の現状・将来展望を示す。

2-2-2 放射光による科学

● 意義

放射光は、ほぼ光と同じ速さで走る高エネルギー電子が磁場によってその進路を曲げられるときに、進行方向に放射される光（電磁波）である。波長分布は連続的で、赤外線からX線まで広い波長範囲の光を含んでおり、指向性がよくて輝度が高い。1947 年に電子シンクロトロンで初めて観測されたのでシンクロトロン放射と呼ばれているが、宇宙で観測されるX線も放射光である。

光の波長は、従来の“可視光”の領域のみならず、それより長波長（赤外線）や短波長（X線）に亘り、原子・分子・物質のより深い理解を可能にする。

● 研究の現状

放射光利用は、分野の異なるスモールサイエンス（少人数で行なう科学）の集合であり、また産官学にまたがる学際、業際分野である。したがって、具体的な利用目的は多彩性に富んでいる。主な目的を分類すると、以下のような内容であろう。

- (a) イメージングおよび微小部分分析：環境関連物質、生体関連物質、薄膜材料、他
- (b) 表面・界面の構造/組成解析：薄膜電子/磁性材料、触媒、機能性構造材料、他
- (c) 高温/高压下の物質構造解析：地球科学に関する物質、相転移に関する物質
- (d) 位相/吸収コントラストCT：隕石、生体組織、考古学試料の非破壊観察
- (e) 単分子レベルの機能計測：細胞内、細胞膜上の蛋白質分子の運動、他

(f) 高速蛋白結晶構造解析：蛋白質分子と薬剤等との相互作用の実時間観察、他
 (g) 電子の運動状態解析：物質の性質(物性)の微視的機構解明と新物質の設計・合成
 これらの研究は、その場での観察や生きたままの観察という形態で行われることが重要である。これらの研究により、新しい自然観を構築し、また、実用研究に貢献することが期待される。とりわけ、ハイライトとして、将来の社会的な課題に関連して、ポストゲノムの本命と考えられている有用蛋白質の研究と関連分野である創薬、あるいは環境保全と結びついた触媒、電池材料等の研究で成果が期待される。

現代の放射光源は、第3世代放射光源と呼ばれる。ここでは、主に真空紫外(VUV)から軟X線までの波長領域の放射光を出す施設(電子エネルギーが10～20億電子ボルト)と、主に高エネルギーX線(硬X線)を出す施設(60～80億電子ボルト)が建設されている。わが国では世界最大の第3世代光源 SPring-8 (80億電子ボルト)のほか第2世代のPF (Photon Factory、25億電子ボルト)と8台の小型光源(10億電子ボルト以下)が稼働している。中でも SPring-8 はX線放射光源として、エネルギー範囲と輝度及び光源の安定度とも世界最高性能を有している。

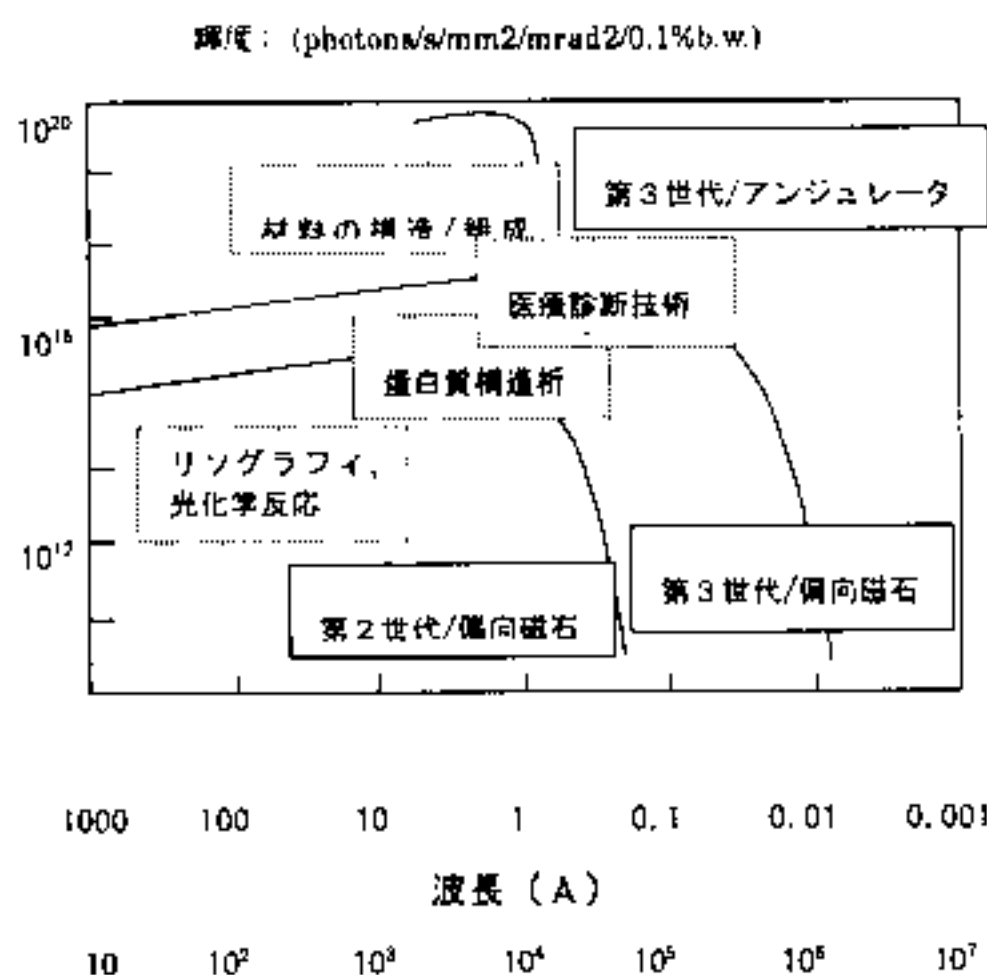


図 放射光の輝度比較と利用分野

上記 (a) - (g) の放射光利用は、我が国現有の放射光施設で既に実施可能であるが、とりわけ、高輝度放射光を供給可能な SPring-8 の活用が期待される。

● 将来展望と研究開発の進め方

放射光の将来計画については、より高性能の放射光源(第4世代)の実現と、先端

科学技術開発の基盤的施設としての放射光源の整備が世界的に進められている。前者は世界的に開発が競われているX線自由電子レーザーの開発計画で、干渉性X線を実現して物質構造解析・特性評価技術、X線画像技術を開発するとともに、非線形現象の研究を行う。現在、ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) とスタンフォード線形加速器研究所 (SLAC) で建設中であるが、我が国でも技術的検討が進められている。また、国際的なネットワークが結成され我が国からも参加しているが、SPRING-8 で開発した真空封止型アンジュレータや高熱負荷ビームライン部品が高く評価され、また、現在建設中の長尺アンジュレータビームラインの利用が注目されている。

最近、新第3世代放射光源と呼ばれる中型放射光施設の建設がスイス、イギリス、中国で進められている。これは25ないし35億電子ボルトの高性能蓄積リングに挿入光源を設置して、高輝度X線を得る光源建設計画である。我が国の先端科学技術研究開発能力を考えると、このような基盤的研究施設は不足しており更に充実させる必要がある。

2-2-3 荷電粒子による科学（意義、研究の現状、将来展望と研究開発の進め方、等をもう少し整理すべきか？）

加速器よりのビームの典型は荷電粒子である。荷電粒子には電子、陽子、重イオン、等があり、これらの粒子を標的に照射したときに得られる中間子、中性子、ミュオン、反陽子、ニュートリノ、等の二次粒子のビーム利用も進みつつある。これらの二次粒子ビーム科学も、広義にとらえて荷電粒子による科学と呼ぶ。中性子は次節で述べることにし、本節ではこういった広義の荷電粒子による科学を述べる。

重イオンおよびその二次粒子としての RI ビームは、最近大きな発展を遂げ、三千種にも及ぶ原子核の生成およびその利用が可能となりつつある。特に RI ビームは我が国の研究者により開拓されたものであり、世界的に急速にその利用が拡大している。RI ビームにより初めて宇宙における元素合成の研究が地上の実験で可能となり、元素合成過程の解明が進められつつある。また広い範囲の原子核の性質解明が可能となり核物理学の新しい進展を促しつつある。

原子炉開発が進められていた頃、核による中性子吸収の研究は原子炉設計の基礎データを与えるだけでなく、原子核物理の基礎を与えるものであった。このような状況は基礎研究と応用技術開発の急激な進展をもたらした。現在では、RI ビームによる反応の研究は元素合成や原子核の性質解明にとどまらず、核変換技術や加速器駆動型原子炉の開発に必要な基礎データを与えることとなり、類似の状況にあるといえよう。

重イオンによるガン治療は始まったところであるが、重要な成果を上げつつある。RI ビームも含めて、今後はさらにより効果的な治療、さらには代謝や生理機能の解明にも供されよう。また生成される多種の RI をもちいたマルチトレーサー技術は新材料の性質の解明、生体物質の情報の解明、環境中元素の移行機能の解明に有効である。

陽子、およびその二次粒子として生成される反陽子、K 中間子、パイオン、ミュオ

ン、ニュートリノも幅広い基礎研究課題と応用の可能性を持っている。特に物質の究極を知る研究にはとりわけ重要な位置を占めている。質量の生成機構の解明、物質と反物質の理解、素粒子（陽子や中性子など）の内部構造の理解などである。また大強度陽子中性子ビームを作る道具ともなっている。

ミュオンビームの利用は日本人研究グループがその発展に大きく寄与したものである。μSR法は物質内部の電磁構造の研究にユニークな方法を与えている。また最近では生体物質中での電子情報伝達の解明にも有効であることがわかってきた。ミュオンはまたミュオン触媒核融合という新しい核融合法の開拓を担っている。

ニュートリノは、現在素粒子物理にニュートリノ振動という新しい話題を提供している。また長期の開発の後には地球の裏側と直接通信できるニュートリノ通信という新しい方法を提供する可能性を秘めている。

数100MeVの陽子は、ガン治療に優れた性質と経済性を持つといわれている。今後加速器は経済性の発展と共に医療の分野に大きな発展をもたらす可能性がある。電子はこれまでもその利用がよく進められてきたビームである。最近では放射光を発生させるビームとしての働きも顕著である。

これらのビームを用いた研究や技術開発に加えて、加速器技術の開発は社会を支える技術基盤として重要なものである。加速器技術は真空、高電圧、rf、材料、電子、通信など種々の技術の集大成であり、これらの技術の最先端をさらに押し進める働きを持つ。最近の加速器およびそれに関連して、ビームの大強度化、ビームの高機能化、超高感度検出、大量データ処理、自由電子レーザー、マイクロビームなどの技術開発が重要となっている。

（表：先端技術研究開発、先端技術研究開発）

（参考：OECD/Megascience Forum Nuclear Physics working group report）

2-2-4 中性子による科学

● 意義

中性子は電荷をもたず、X線や電子線等と異なり、原子番号の小さい原子核と散乱する。この性質を利用して、タンパク質に単独又は水分子として結合している水素原子の配置を決定し、タンパク質の機能を研究することが注目されている。いわゆる「構造ゲノム科学」である。この水素原子は生命体における遺伝情報のやりとりに重要な役割を果たすので、構造ゲノム科学は21世紀の生命科学のフロンティア研究として期待されている。また、水素やリチウムは燃料電池や蓄電システムの性能を決定するため、中性子ならではの特徴を利用してこれら原子番号の小さな原子の働きを説明でき、実用的な材料開発研究を促進できる。さらに、中性子はX線よりも物質の内部にまで到達できるため、羽根、金属パイプのような構造体などの工業製品を非破壊的に診断する道具となり、品質のよい製品開発に役立つ。

また、中性子が最小の磁石としてのスピン（磁気モーメント）を持ち、微少磁石の役割を果たす性質を利用すると、高温超伝導体の伝導機構を担う電子の性質の解明、さらにその研究を進めて新しい超伝導・磁性材料等の開発が期待される。さらに長波長の中性子（冷中性子と呼ばれる）の利用により、より大きな構造スケールを持つ高分子、液晶、ガラスなどの分子規模で複雑系を構成する物質の構造や分子運動が解明でき、各種の新しい材料開発に役立つ。他方、工学的には、革新的な原子力システムの実現の一環として、使用済燃料中の長寿命放射性核種を核変換するための大強度陽子加速器で駆動する核変換システムが考えられる。

● 研究の現状

タンパク質については、骨格構造とともに、さらにその機能の解明まで求められる時代であり、解明につながる構造ゲノム科学は国際的競争力が非常に高い分野と言える。燃料電池や超伝導物質等の物性研究も国の産業力を高める基盤として国際的競争力の高い分野と位置づけられる。一方、その微視的機構解明が新たな科学を創出しつつあり、さらに工業的利用が進んでいる高温超伝導体や巨大磁気抵抗酸化物などは、我が国が基礎・応用研究両面で世界のトップレベルにあるが、これらの基礎研究に中性子は中心的な実験手段を提供する。

現在、中性子源としては研究用原子炉と加速器によるパルス中性子源（以下、加速器駆動中性子源）を利用している。研究用原子炉は定常的な中性子を供給できる特徴を有し、ラウエ・ランジュバン（フランス、ILL）研究所の施設が世界最高強度を有する。日本では日本原子力研究所の研究用原子炉（JRR-3）がILLの約4分の1（熱中性子強度）の強度であり、世界の四指に入る。

一方、加速器よりの中性子源は瞬時的なパルス状の中性子を発生させる特徴があり、1960年代に日本で生み出された技術である。しかしながら、現在では、世界最高強度はラザフォード・アプルトン研究所（英国、RAL）の施設（ISIS）で得られている。ILLの原子炉と比べて、その瞬時値はほぼ同じ強度に達するが、平均強度は2桁程度低い。日本の高エネルギー加速器研究機構（KEK）のパルス中性子源（KEN S）はISISの30分の1程度の強度に留まっていて、施設規模としては欧米の後塵を拝している。

● 将来展望と研究開発の進め方

現状は中性子を探索子として、生命科学、物質科学において物質の構造を「見る」研究が進んでいる段階である。しかし、タンパク質の1つの構造を決定するための測定には数十日を要しており、何十万種類もの構造を解明するには、強度の高い中性子源による効率化が不可欠である。また、今後は、大強度中性子による高分解能実験や偏極中性子の利用により、骨格構造に加えて分子振動の観察から機能解明が可能になる。すなわち、「極める」レベルへの研究に進展できる。機能の解明が達成できれば、抗生物質、抗ガン剤等のドラッグデザイン（薬剤設計）、遺伝子病の原因解明、環境

ホルモンの生体反応に及ぼす影響解明など私たちの生活に大きく役立つ成果が期待できる。また、燃料電池、高温超伝導体などの産業用新材料、新機能材料、電子デバイス等の研究開発も同様に飛躍的に進むと考えらる。このように、中性子の用途は幅広いため、中性子利用研究者は著しく増加しており、この傾向は今後も続くと思われ。

一方、加速器駆動核変換システムは使用済燃料中の長寿命放射性核種の低減を実現し、廃棄物処理に係る負荷の緩和、社会的受容性を向上する技術選択肢の1つになる。また、このシステムは潜在的にはエネルギー源としての可能性も有する。システムの概念設計とともに加速器の性能、未臨界炉の核熱特性、材料特性等の技術的評価を第一目標として、システムの実証に向けて、段階的に研究開発を進めるのが妥当であろう。

結論から言えば、この分野の高揚のためには、現在よりも100～1000倍の強度を有する中性子源が必要とされる。このことは、OECDメガサイエンスフォーラムにおいても提案されている。

2-2-5 強力レーザー光

● 意義

1990年代は光と物質との相互作用がはっきりと示され、レーザー光の物質的な側面が明確に出てきた時代である。レーザーの出現は1960年代であり、ほとんどのレーザーが発明された。70年代には科学的な研究手段として発展した。80年代には光通信やエネルギー関係の技術的な蓄積が進んだ。その結果、90年代に我が国では光技術が数兆円産業に発展しているほかエネルギー、環境、生命科学などの分野で実際の利用に展開しようとしている。レーザーの特徴は、エネルギーの集中性と周波数の同調性、波長可変性が挙げられる。また、物質との相互作用という面から現在では光量子科学という新たな分野ができつつあり、高出力レーザー光と物質の相互作用の研究は今や非常に先端的な分野になっている。

● 研究の現状

パルスレーザーは、レーザーダイオードの高出力化などにより、10年間に二桁のエネルギー上昇が見られる。現在では1パルス当たり1キロジュールで10ヘルツのレーザーが開発対象となっている。また、個別の技術、例えば大型の材料化学や光工学における総合的な発展が大型のレーザーを支えてきたことにより、ピークパワーでは約3年で10倍の伸びとなっている。国内では、ハイエナジーレーザーシステムの開発やピークパワーの高いレーザーの開発を行っている。海外では、若干軍事的な要素も持つビッグサイエンスとして、米仏ではメガジュール級のレーザーが建設されつつあり、欧州共同体では共同して大型の装置を共通で使うという動きが、ここ2年ほど活発となっている。

ピークパワーレーザーが持つ可能性は非常に広く、基礎科学や医学応用への展開が期待されるため、繰り返しの早い、産業応用にも展開可能なX線レーザー用のドライバとして開発が進められている。このほかにも、レーザー同位体分離や加工についてのフォトン・プロジェクトなどの様々な計画が進められているところである。また、超短パルスレーザーからでるX線は非常に強く、サブペタワットのレーザーで鮮明なラジオグラフィが得られることから、医療関係にも役立っている。

● 将来展望と研究開発の進め方

レーザーは、原子力研究開発において、核融合のみならず非常に広い範囲に関わりを持つことが期待される。このため、高エネルギー、超高出力、X線、極超短パルス、自由電子レーザーなどの先進レーザー技術の開発を進めることは重要である。レーザー科学は、学際的な領域を広くカバーしており、単一の組織が行うものでなく、多くの組織がネットワークを作り、進めていくべきである。また、その際には、レーザー科学に携わる者と加速器の装置開発者との間での緊密な連携の下、効率的・効果的に推進していくことが不可欠である。

2 3 持続可能な発展を目指して

エネルギー源としての原子力の研究開発を進める上で、環境との調和、エネルギーとしての可能性、安心して使える技術、という視点が重要である。未だ実用化されていない原子力に対しては、大きな可能性を持つ技術には積極的な関与をすべきである。本分科会では、「持続可能な発展」を図るための研究開発の事例として、核融合の研究開発、原子炉の技術革新、研究用原子炉の3つを取り上げ、これまで培ってきた技術をレビューし、将来の可能性を検討した。検討にあたっては、研究開発の動向、将来展望を分析し、さらにはそれが国際競争力や指導性を日本にもたらすか否か検討した。

エネルギーの恒常的供給という観点からみると、核分裂炉を利用する原子力発電は今後とも必要である。一方、将来のエネルギー源を考えた時、核融合の研究も着実に進めていかなければならない。核融合の研究は、いまだ基礎研究の段階にあるが、今後、核分裂炉だけに原子力エネルギー源を頼ることもできない。そのため、核融合研究は今後とも息の長い研究が必要である。特に若手研究者が意欲と意義を感じられるようリードすることが必要であろう。

2 3 1 核融合研究開発

● 意義

太陽のエネルギーは核融合反応によって創られる。地球上で人工太陽としての核融合エネルギーを創り出すのが核融合研究の目標である。燃料資源としては無尽蔵にあり、核融合によるエネルギー生産が可能になれば、炭酸ガス問題などの地球規模の環

境破壊の問題も少ない。さらに、化石燃料や資源に乏しい我が国が、地球的資源偏在というハンディキャップから逃れられるであろう。また、連鎖反応がないため、安全なエネルギー資源であり、エネルギー安全保障に寄与する。さらに、地球上のどこでも資源が得られることは、国際政治環境に影響されにくいことにもなる。

● 研究の現状

プラズマ核融合としては日本原子力研究所の大型トカマク JT-60U で世界最高の核融合パラメータを達成した。また、九州大学の超伝導コイル付きトカマク TRIAM-1M で2時間を超えるトカマクプラズマ放電制御に成功した。一方、トカマクとは別の方式を採用するヘリカル装置、逆磁場ピンチ装置なども研究が進んでおり、核融合科学研究所で超伝導コイルを持つ世界最大の大型ヘリカル装置LHDが完成し、その成果は世界の注目を集めている。一方、レーザー核融合では、高速点火方式が注目されており、大阪大学レーザー核融合研究センターで、レーザー爆縮により固体の600倍以上の質量密度を達成した。さらに、プラズマ物性の理論的基礎付けが進み物理学としての普遍化が図られた。

このような研究領域では、日本が世界をリードして進めてきた。まさに、科学技術立国によって日本の繁栄を支えるというモラルに大きく資するものであろう。

● 将来展望と研究開発の進め方

これらの成果によって、今後達成・解明すべき課題として

(1) 核融合燃焼状態の実現

(2) 低い循環入力による定常維持

(3) トリチウムを燃料に使わない核融合炉に向けた概念開発、

等が明瞭になった。したがって、重水素とトリチウムを用い、制御された点火と長時間燃焼を実現し、定常運転を実現すること、すなわち、核融合炉工学技術の総合試験を行い、次の原型炉段階への知識基盤を構築することは、今後の重要な懸案となる。あわせて、定常化と運転コストの観点から循環パワ^{*}の低減化を目指す研究としてのヘリカル系やトカマクの研究、また、慣性閉じ込め方式や他の磁場閉じ込め方式などの研究が課題となろう。さらに、トリチウムを燃料に使わない低中性子炉を目指す萌芽的研究も重要である。理論研究も推進し、未踏領域の予見をはかり、特に、多種の知識集積を普遍法則へと体系化することに力を入れ、総合科学化を進めることも大切である。

現在の核融合は、「研究開発」で総称される第三段階にあり^{*}、第四段階において原型炉を用いた定常核融合発電を実証する。この段階ではじめて核融合発電が実現し、実証炉に必要な技術基盤が確立される。この段階に至るまでには、今後**年の開発期間を要すると考えられる。したがって、今後10年の主目標は第三段階の研究開発

^{*} ここで第一段階と第二段階に関して、それは何であったかをコメントしておく。

となるが、そこでは、基本的には、段階的な開発計画を採用すべきである。核融合炉は大規模システムであることから、節目ごとの適切なチェックアンドレビューを行い、リスクを抑制する。また、核融合研究は国際協力で行われることが多く、協力の中の激しい競争で開発計画を堅固なものにしていく注意が必要である。さらに、国際的に通用する若手養成を一段と強化すべきである。

2 3 2 原子炉の技術革新

■ 意 義

21 世紀を展望すると、次世代大型軽水炉の開発とともに、新たな社会的ニーズを満たす革新的な原子力エネルギーシステムの開発が期待される。すなわち、高い経済性ととともに、① 電力供給の多様化、② 熱利用等のエネルギー供給の多様化、③ 立地の多様化、④ 多くの国々への原子力エネルギー利用の普及などが、21 世紀には重要になる。このため、高い経済性、人との関わりが少ない高い安全性、プラント容量の柔軟性、運転保守の容易性、熱利用への適合性、核不拡散性に優れた原子炉システムの開発を目指す必要がある。

● いかに関現するか

このような要求を満足する原子炉システムには、革新的概念、革新的技術の導入が期待される。たとえば、

- ① 人との関わりの少ない安全性に基づく安全設備の大幅簡素化
- ② 革新的技術による系統・機器の一体化
- ③ ガスタービンの採用等による高効率化、システム簡素化
- ④ 温度、圧力の上昇による高効率化
- ⑤ 工場内完全生産、工期短縮
- ⑥ 標準設計モジュール連続生産
- ⑦ 原子炉の小型化と出力密度等を適切な選定によって、自然循環、熱伝導、輻射等による炉心冷却等の完全受動的冷却
- ⑧ 高い負のフィードバックを利用した完全受動的原子炉緊急停止機能を有する原子炉システム
- ⑨ 熱供給併用として需要地に近接して設置される分散型エネルギーシステム
- ⑩ 高転換炉心、超長寿命燃料などの革新技術による長期燃料無交換など高い核不拡散性を有する設計

このような革新的概念・革新技術によって高い経済性、人との関わりの少ない高い安全性、運転保守の容易性、熱利用適合性、核不拡散性を備えた革新的の中小型炉は、21 世紀の新たな原子炉システムとして期待される。

● 社会や科学技術への貢献

革新的の中小型炉の開発によって、人との関わりの少ない高い安全性と高い経済性を

備えた新たな原子力プラントを実現することができれば、国内において、原子力によるエネルギー供給の多様化、電力供給・立地の多様化が図られ、大型炉と同様、我が国における温暖化ガス排出量の削減、エネルギー供給の安定化に貢献することが期待できる。さらに、多くの国への普及に適した原子力プラントの実現により、開発途上国を中心とした急速な経済成長と、地球環境問題、資源問題の両立への貢献も期待される。このように社会的意義の大きい革新的な原子力エネルギー技術の開発は我が国の原子力産業の活性化そして若い世代への魅力的な技術分野の提供につながることを期待できる。

● 将来展望と研究開発の進め方

革新的中小型軽水炉、中小型高速炉および高温ガス熱利用炉についてはいくつかのプラント概念のアイデアが提案されている。これらの各種中小型炉については、まず大型炉に勝り得る安全性、経済性を目指し、具体的ニーズに対応したそれぞれの最適概念の構築、革新的要素技術の開発などを、国の研究機関を中心として、産業界、大学等が協力して検討する。テーマの選定にあたっては、公募など、競争により優れたアイデアが発掘できるシステムを導入し、研究開発の活性化を図る。さらに、次の段階として、開発の候補となる概念を選定し、技術的・経済的フィージビリティ検討を実施し、将来の実用化に向けた評価を行う。これらの研究の評価にあたっては、官学民共同の横断的な評価の場を設置して実施することが望ましい。

高温ガス発電炉については、基盤技術は開発済みで、実用化のための技術開発と実証が残された段階にあるといえる。海外において技術的・経済的に実用化が可能であるとして建設計画が進められている例があるが、我が国で実用化に向けた開発を進めるべきかを判断するための評価がまず必要である。このため、これまでの経験、技術蓄積の上に立って、高温ガス炉の開発を進めてきた国の研究機関が中心となり、産業界が協力して、実用プラントの技術的・経済的フィージビリティ検討を実施する。その結果と高温工学試験研究炉（HTTR）の運転・試験実績をもとに、総合評価を行い、原子力政策の中での位置付けを明確化する。

革新的中小型炉の開発は、海外においても関心が高いため、国際協力により開発の効率化を図ることも重要である。我が国は原子力利用のフロンランナーとして、実績に基づく技術をもって、国際協力を主導することが求められる。

2 3 3 研究用原子炉

● 意義

我が国に初めての研究用原子炉が建設されてから、既に 43 年が経過した。この間に、多くの試験研究用の原子炉が原研、大学、民間に建設され、原子力をエネルギーとして利用する研究開発や原子力分野の基礎・基盤の研究、原子力人材の育成や教育等に利用されてきた。特に、原子力エネルギー利用の研究開発では、発電用原子炉の

燃料や材料の試験や開発を中心に多くの成果を挙げるとともに、原子炉の運転実習等を通じて、我が国の原子力人材の育成に実績を挙げてきた。

● 研究の現状

近年では、原子炉から得られる中性子ビームを利用して、物性研究、生物研究等の基礎研究の分野で学術的な成果を挙げるとともに、中性子の照射場を利用して、シリコン半導体材料の製造、医療用および工業用ラジオアイソトープの製造、ホウ素中性子捕捉療法による脳腫瘍の治療等、産業や医療の新たな分野への応用が展開されている。

● 将来展望と研究開発の進め方（もう少し方向性だけを記するに留める）

将来展開については、まず発電炉の高経年化や軽水炉燃料の超高燃焼度化に係る研究開発がある。また将来型原子炉の研究については、岩石型燃料等の照射研究が期待されている。中性子ビームを利用した中性子散乱実験では、低温や高圧あるいは強磁場といった極限条件での物質研究、高分子や生物といったソフトマテリアルの研究、超伝導材料等の機能材料の構造評価等の研究等に関心が高い。また、放射化分析や中性子ラジオグラフィは宇宙・地球科学、環境科学などに係わる研究により幅広く利用されることが考えられる。照射研究では、照射下でのその場測定技術や実炉に対応した応力、水質、照射レベル等の複合環境制御技術を開発することにより、照射損傷機構の解明に向けてよりミクロなレベルでの研究への展開が図られつつある。例えば、軽水炉一次冷却材環境下での照射後試験技術開発は、軽水炉ペレットの径方向領域での情報が得られ、安全裕度の確認、設計へのフィードバックが可能となる。一方、基礎研究に関しては、高分解能電子顕微鏡を用いた照射材の組織観察、解析による照射損傷機構の解明、さらに、ナノレベルの組織と強度特性の相関性の解明が期待される。研究用原子炉はこれらのニーズの高度化に対応し先端的な研究で世界をリードすることが求められており、それぞれの炉の特徴をより生かす方向でその性能を向上し適切な更新も含めて対策をとる必要がある。動力炉用の材料照射研究については研究炉とともにホット（照射後）試験施設の高度化と整備も重要である。

高経年化した原子炉も多いので後継者の育成を念頭に入れて効率的な運転維持管理対策を用意する必要がある。研究機関、民間、大学の間の相互の連携強化する必要がある。なお、研究炉の利用と管理運営を総合的に促進する研究炉機構の考え方も検討されている。

研究用原子炉は今後も動力炉開発の材料の試験や研究、理工学のためのビーム利用や分析、産業や医療における利用と人材育成や教育に大きい役割を果たすことで原子力科学技術に貢献すると期待される。

研究炉の使用済の高濃縮ウラン燃料の米国への返還の期限は 2009 年までであり、その後については、使用済燃料の処理についての見通しが立っていない。現在の研究炉の設置許可申請書では燃料の再処理を前提としているため、再処理を前提とした米国への搬出が不可能になれば、国内措置を検討する必要がある。この場合、再処理に

加えて、直接処分についても選択肢の一つとして検討することが望ましい。研究開発に伴う廃棄物の処分と共に、使用済燃料についても落ちこぼれのないように包括的な対策を用意し、実施することは国民の原子力への信頼確保の点でも重要である。

なお中性子利用における研究用原子炉と加速器中性子源の関係は相補的である。即ち原子炉は動力炉と同じ中性子スペクトルであるのみならず連続ビームで大きい体積の照射が可能で相乗りで実験することも容易である。加速器中性子源はパルスビームで指向性が良く、異なる性質のビームを発生できパルス特性を生かした利用に適している。

3. 研究開発の進め方

3.1 科学技術の目標と進め方

● 一般的視点

科学技術基本計画は、国が進めるべき科学として次の3つの柱の実現を目指すことを指摘している：

- 1) 知的存在感のある国
- 2) 安心・安全な生活ができる国
- 3) 国際競争力のある国

本分科会においても、基本的には、以上の目標に添った形での先端科学技術の実現を目指すことで意見は一致している。

他の分野の研究や社会での実用化に向けた〈シーズ（種）の提供〉と〈新しいニーズ（必要性）の開拓〉の両方をバランスよく進めるべきである。また新しい原理や法則は科学者の純粋な好奇心に基づく研究から生まれることが多いことも十分認識しつつ進める。

独創性を最大限に引き出し、成果の先駆性を正当に評価される環境の中で研究開発を進めることも重要である。独創的、チャレンジングな研究課題を重視、減点法でなく加点法、絶対評価より世界レベルの相対評価をすべきである。また計画の独自性や独創性に評価を与える。

未踏領域の研究の効率よい実施と高い成果を可能にするために、段階に応じた法律などを立案・整備してゆくことが必要である。さらに、先端的技術開発は21世紀の科学技術或いは産業を支える基盤として重要であることから、研究開発の推進に当たってはその必要性、重要性についての社会的認知を獲得したうえで進めることが前提になると考えられる。このためには、社会への的確な情報発信を行ってゆくことが肝要である。

- ビッグプロジェクトとしての原子力科学技術

原子力研究開発は、本質的に大規模プロジェクトである。その推進においては、人や予算などの研究資源の集中投資が必要である。また、大規模プロジェクトは、長期の研究について目標を見失わずにたえず挑戦することが必要となる。

ビッグプロジェクト故に予算規模が大きく、失敗が許されない点に特徴があるものの、その推進の視点に独創性が基本的に重要であることを重視すべきである。
(この項の記述未完)

- プロジェクト的進め方とプログラムの進め方

原子力研究開発が大規模プロジェクトであることを前提に考えるとしても、真に未踏の研究課題においては、プロジェクトが発足する時に、研究の解答はおろか問題の存在すら気付かれていないことがある。独創的な研究を展開するには、このような研究課題を追求することも必要で、いわゆるプログラムの展開が必要である。「セレンディピティ（掘出し物を上手に見つける）」という視点は、フロンティア研究では必須の要件である。多数の試行錯誤の中から思いもよらぬ発見を生み出す土壌を育てなければならない。そのために、プロジェクト型研究と相補的なプログラム型研究を展開する必要がある。プログラムの展開とプロジェクトの区別は以下のようになるであろう。

「プログラムの展開」	「プロジェクト」
調和・相補的展開	集中投資
萌芽の重要視	初期に目的設定
セレンディピティ	目的達成
公募	分担者会議など
継続的	タイムリミットと見直し
コミュニティ育成	強いリーダーシップ

前節では基礎科学との繋がり的重要性を述べた。さらに、未来の基礎科学の進展があれば、原子力の未来を展開する可能性がある事も述べた。将来の発展に迅速に対応するには、プロジェクト型研究の中にプログラム型展開の手法を導入すべきである。

- 独創的研究の振興

研究の遂行上もう一つ肝要なことは、多種の研究を平行して遂行し、その中から成功例を見い出し、それをその後伸ばしていく原則を取り入れる事である。フロンティア型研究では、成功例を育て上げることこそが重んじられる。それにひきかえ、キャッチ・アップ型研究の場合では、すでに外国で試行錯誤がなされ、その中で成功例が選びだされてしまっている。今後の研究では、フロンティア型研究が重んじられなければならない。

独創的な仕事は、研究開発の最初の段階で「できるできない」が分かっていない研

究である。強い意図と高い能力を持った研究者に自分の動機に駆動された研究へ集中させ、そして試行錯誤を奨励する研究環境の中から独創的な研究が生まれる。その中から偶然の発見や発明が生まれ、連鎖的な研究の発展を可能にする。こうしたことから、多種の研究を平行して遂行し、その中から成功例を見い出すという考え方を原子力の未踏領域の研究政策に入れる事が重要である。

● これからの研究の重点

原子力研究開発に限らず、科学技術の研究開発は、

- 科学技術の発展、
- 経済的な寄与（産業への寄与、エネルギーの確保）、
- 環境・人間福祉・安全性の向上、

の観点から推進すべきである。加速器等ビーム技術に関しては、上記すべてを重視すべきであり、ニーズを先行させるというよりはシーズ開拓型で進めるべきである。しかし、国の予算、施設、研究者の制限から、その活用に関しては柔軟性を持たせつつ大局的に判断する場を恒常的に設けるべきである。

加速器科学のような基礎研究開発の優先度については、基本的には独創性と推進研究者のポテンシャルを重視すべきである。またその産業応用を考慮する場合、さらにその技術の経済的効用、国際的競争も重視すべきである。

一方、核融合開発は将来のエネルギー源開発と言う明確なミッションがあるのでそこに至る道筋を常に見極めつつ基礎研究を推進する必要がある。特に、研究者の創意工夫を考慮しつつも国際的観点、技術の可能性を考慮して優先度を判断すべきであろう。

今後の先端科学研究として、特に基礎科学との繋がりを深めるために、未踏領域への挑戦として「加速器よりの放射光・荷電粒子・中性子」と「強力レーザー光」を特に重要と考え、取り上げた。また、エネルギー源の確保という観点から今後も持続的研究を続けるべきテーマとして「核融合研究開発」「中小型炉」そして「研究用原子炉」の3項目を取り上げた。これらの先端科学研究は、来世紀に重要となる研究テーマであり、オリジナリティ、意義、国際競争、経済的効用、発展性、文化的・学術的貢献度、等々の観点から定期的に評価を行いながら進めていくべき事業である。

3 2 棲み分けから相互乗り入れへ

産官学の協力、それぞれの産や官や学の内部でも、棲み分けから相互乗り入れの必要性が生じている。

一般的に言って、研究者数の最も多い大学においては、第一に研究者の独創性を重視した研究開発体制が望ましい。しかしながら、予算・研究者数等ある程度の規模が必要である研究課題においては組織が形成されるべきである。一方、国公立研究所に

においてはミッションを重視した研究推進がなされることも多く、大学や研究所間の役割分担が必要である。また産業界においてはそのミッションはさらに明確である。

このような役割分担を踏まえ、まず分担を明確にしておくべきであろう。基礎的、先端的研究は国が主導し、研究開発成果の利用・応用分野の技術開発等は民間が主導すべきである。但し、国の基本政策に関連する重要な研究開発については実用化開発までを国が責任を持って主導することが望ましい。

一方、相互に協力関係を強化することも重要である。たとえば、放射光分野はビッグサイエンス由来の加速器と、スモールサイエンス由来の光利用分野という異質分野が結びついて形成されたものである。また、放射光利用分野の内部も、物理系、化学系、生物系、医学系などの異なる分野の集合体である。さらに、利用者の所属は産官学に分布する典型的な学際、業際分野である。このような分野で成果を上げるためには、分野間の協力が必須となるが、協力だけで充分であるとはいえない。相互乗り入れを積極的に行うことが重要である。すなわち、多数の小型融合プロジェクト（産官学）により新技術を創出し、選択と集中により、先導的技術分野の策定と推進を行い、新事業分野創出を目指すことが望ましい。このプロセスには人事交流、国際交流、あるいは人材の育成もともなう。

また、得られた結果を生かし持続的に発展させるためには、知的所有権やさまざまなノウハウを含む成果活用方法の整備（知的資産活用のシステム化）が必須と思われる。

産業界と学官界との相互乗り入れにあたっては情報発信が重要な要素となる。産、学及び官の各専門分野毎の研究発表会、講演会、学会誌等による情報発信及び交換はもちろん重要であるが、原子力先端技術の応用分野の広さを考慮すると、他分野の研究者、産業界への先端技術の利用・応用面に関する分かり易い形の情報が発信されることも重要である。そのためには、関連情報の一元管理を行いインターネット等のツールを通じて情報発信及び交換が可能なシステムを構築することが有効である。

また、産学官の仲介的な役割を担い分かり易く円滑かつ効果的に双方への情報提供を行うコーディネーターを養成し活用することが有用と考えられる。なお、研究成果の具体的な技術移転に関しては、現在各地に設置されつつある技術移転機関（TLO）を効果的に機能させることも有効な手段と考えられる。

このような「棲み分けから相互乗り入れ」を円滑にするには、各分野で研究者が独立に使っている「計算科学技術」を相互に乗り入れ、ネットワークの中で協力して使うように配慮すべきである。

3 3 強いリーダーの育成

大型プロジェクト遂行について今後重要な点は、大型プロジェクトにおけるリーダーの存在とリーダーの育成である。リーダーは正しい判断をし、グループ全体の研究の成否を握ることにもなるが、それだけではない。強いリーダーの存在は、技術の正

しい伝承にとっても新しい技術への挑戦にとっても、最も重要なキーとなる。さらに、国際社会に発信する先端科学技術事業にとっても、強いリーダーの存在は、国際的発信という観点からも欠かせない。日本が真の意味で世界の牽引力になるには、リーダーの育成が将来の成否のカギを握る。

プロジェクトリーダーの育成を意識的に振興すべきである。そのための施策は、常に複数のプロジェクトがあり、リーダーとなるチャンス若い研究者に回すことである。それと平行して、参謀本部のようにプロジェクトの評価を恒常的におこない、結果を蓄積し「歴史に学ぶ」リーダーをつくり出す事である。

リーダーには、プロジェクトのメンバーがオリジナルな研究を最善に上げうる様プロジェクトを運営する責務が有る。オリジナルな研究とそれを生み出す環境が何か、若い研究者が常に自己教育できる環境を作る。そういう中からリーダーの候補が出るようにすべきである。

3 4 適切な評価とその反映

プロジェクトの実施には、最適の実施体制の実現と適切な評価活動の実施は、両者ともに重要である。特に大型研究には、事前評価、中間評価、事後評価が重要であろう。事前評価については、先端的基礎研究については上述の独創性と研究者のポテンシャルを重視すべきである。中間評価については、国際的競争等種々の周囲状況の変化等を考慮して、柔軟な研究変更等が出来るよう評価を行うべきである。事後については、今後の発展性を含めて評価すべきである。事前評価は厳しくするのはよいが、むしろ事後評価を重視すべきである。またその評価はあまり短期的視点にこだわるべきではなく、長期的視点を重視すべきである。

研究開発の実施計画及び結果の評価に際しては、研究成果の進展や社会状況の変化に的確に対応するための実効ある評価システムの構築が重要であり、このシステムを通じ研究開発状況のチェック&レビューや、場合によっては、研究開発の中止を含む計画見直しを的確に実施することが望まれる。

その際、外部評価による透明性の確保という観点も重要であり、評価基準・過程が外部からも判る透明性のある明確な評価実施方法の確立、第三者による外部評価の導入、評価結果の公開を行うことが望ましい。

3 5 人材の育成

先端技術開発の芽をはぐくむためには、技術者育成、教育基盤整備、技術の伝承等を着実に進めていくシステムの必要がある。特に科学技術の継承に関しては、理解を深めるための若人に対する一般的教育と、時代を担う研究者・技術者の育成が重要である。

また、安全性や高性能使用を支える技術力の確保と継続的発展は極めて重要な課題である。そのためには教育を含めた人の育成が最も重要である。若い人に夢と意欲を

を持たせる方策が必要であり、先端的研究に夢を抱かせるような、プロジェクトの推進が重要である。

(この項の記述未完)

3 6 技術革新と原子力工学研究教育

原子力工学は総合でありその研究開発によって多くの分野の技術革新と先端技術を進めると期待される。日本の国際競争力向上のためにも原子力による技術革新の追求が必要である。

大型プロジェクトや主要産業の推進側は心理的戦略的に保守的になりがちであり、技術革新のためには研究予算を多様化し特定の対象に限定されない研究環境を整備することが必要である。数%程度の予算を技術革新のため独立分離して使用すべきである。従来ややもすると大型プロジェクトに目を奪われがちであるが、大型プロジェクトの推進により周辺の特徴ある研究環境が失われないような配慮も必要である。

技術革新は基礎的学問の素養の上に自由で豊かな発想をすることで可能になる。大学は学問の横断性、フレッシュな人材の供給、プロジェクトに拘束されないこと、教育との兼務による低コスト構造など技術革新の追求に適した組織である。その研究教育設備の充実が必要である。

技術(工学)と科学(理学)はスパイラル的に発展する。科学のみならず技術や工学を重視してバランスのとれた研究開発を進める必要がある。

原子力工学は工学と理学の境界に位置し経験的な工学革新の先兵である。応用に軸足を置いて理学の視点もと入れ計算機や情報技術を用いることで経験的な工学をより演繹的な工学へ発展させることができよう。

これにより研究開発に必要な期間やコストが大幅に低減し産業の競争力の向上が期待できる。

学問や技術の革新にはハード(設備)のみならずソフト(人材、利用運営体制)の整備充実も重要である。

3 7 先端の原子力技術開発成果の産業界および地域への展開

加速器科学を例にとって考える。

加速器科学の応用は、現在、主として国立の研究機関等で行われている。民間での利用の促進、特に、中小企業における利用の普及は我国の原子力科学技術および原子力科学技術産業の基盤を築くものであると考えられる。このためには、多様な職種の利用者のための「多目的加速器センター」を全国、各地区ごとに配置する必要がある

(この点議論していないので記述するかどうかは要議論)。「多目的加速器センター」には、医療診断用加速器(PETに利用)、治療用加速器(重粒子線治療)、新材料創成・材料加工・材料改質用加速器、新機能素子開発用加速器、環境保全用加速器、バイオ技術用加速器など複数の加速器を整備した施設群で構成される。これら加速器の有

機能的利用も含めたイオンビーム応用技術の発展の成果が民間レベルで独立して発展していくことが期待される。

一方、加速器科学応用の発展のためには、学校教育での加速器科学に関する知識の習得による国民の原子力科学または量子工学の理解を深めることが重要である。特に、加速器科学の場合は、じかに体験することによる学習がもっとも効果的である。全国の教育機関等に、大衆利用可能な（理系の人だけでなく文系の人にも興味を持つような加速器応用、例えば、超小型加速器による分析応用）加速器を配備するなどして、これに対応する必要がある。

3 8 国際競争と国際協力

未踏研究の先端を切り開くフロント・ランナーの研究では、研究水準を上げることにより貢献すること、そして尊厳を持ち文化をリードできることが国際貢献であろう。またそれは、競争でもある。原子力研究は根幹でエネルギーの安全保障とかかわる。エネルギーの自給は科学技術の自給から始まり、また、国際規格のヘゲモニー追求も必要である。そうした努力を通じて、日本に対する「技術ただ乗り論」に応答することを始め、文化の刻印を打ち、文明のリードを図ることで国の尊厳をもたらすべきである。

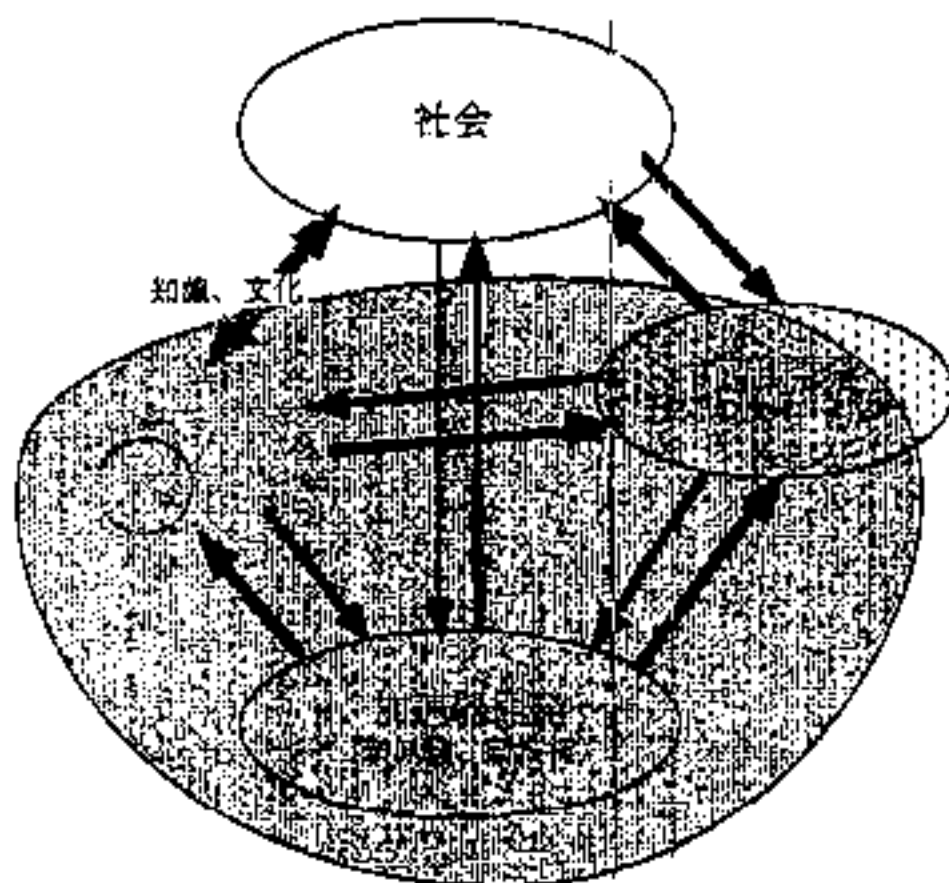
また、国際的分担・協力のもと我国が積極的に貢献できる領域を見極め、先進諸国の一極を担う責任をもって取り組む。特に責任、分担、協力で我が国が果たすべき役割を明らかにすることが早急に望まれる。

（この項の記述未完）

4. まとめと提言

（この項の記述未完）

原子力先端的研究開発（加速器の例）



- 
道具、方法の提供
 (大施設、高エネルギー、粒子の種類、クオリティ...)
- 
デマンド
- 
科学的キュリオシティ

加速器の発展

地球環境との調和

光・荷電粒子・中性粒子を
「知る・創る・使う」

ミクロな機能を人類社会に活用
する技術の創造



重イオンビーム

RIビーム

放射光

電子ビーム

中性子ビーム

陽子ビーム

原子力による

原子炉技術の発達

放射線利用の拡大

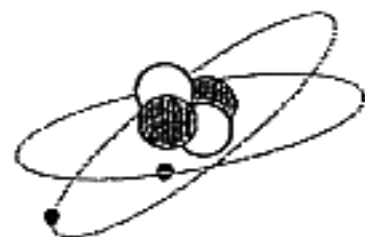
放射能の発見

我が国の放射線

利用開始 (植物トレーサー)

原子核の発見

サイクロトンの発明

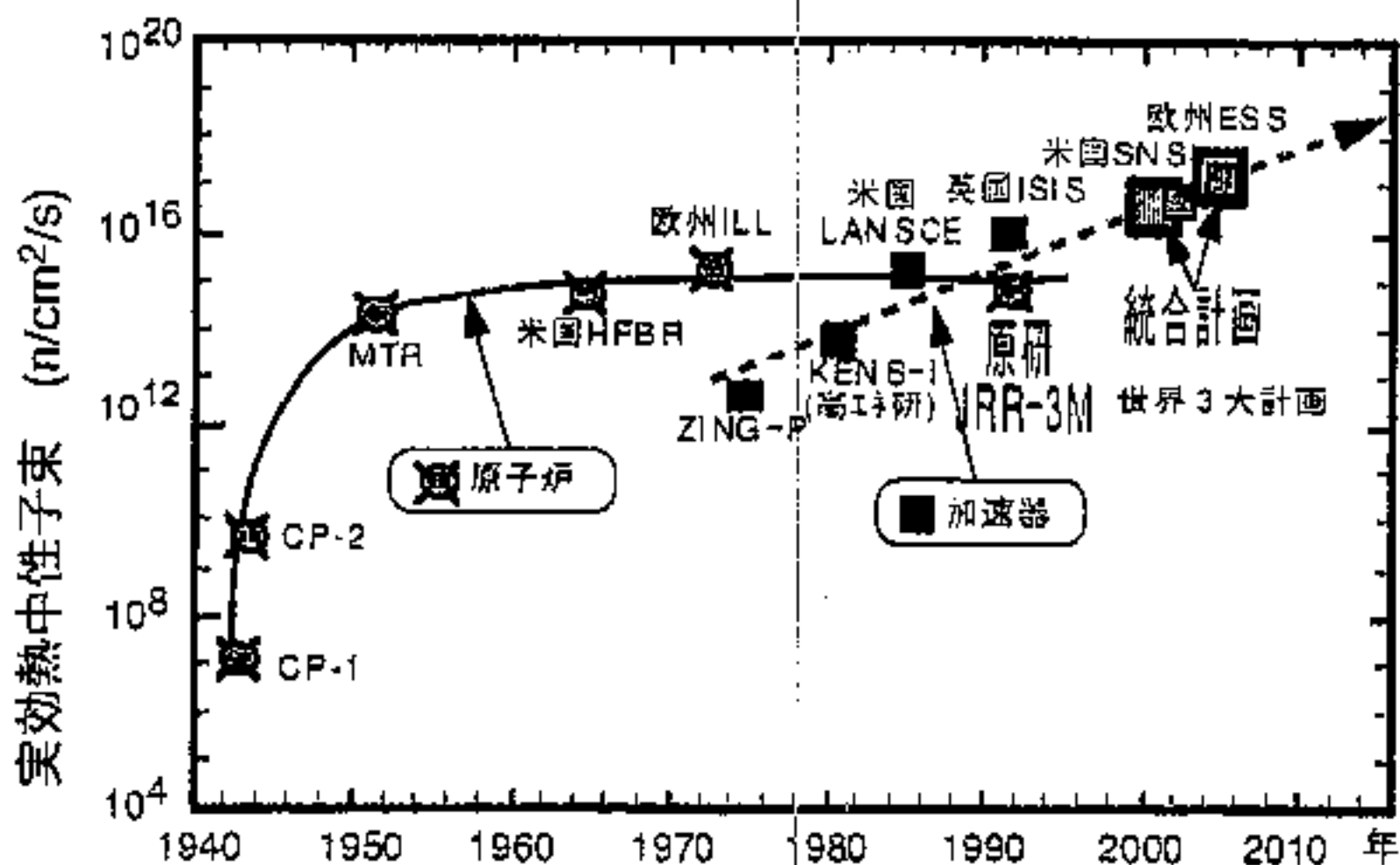


		知的フロンティア (物質の境界)	物質・構造の解明 (基礎的研究)	先端技術と応用 (シーズ関係)	21世紀の材料・技術
光	レーザー	連続波化 極端パルス化 高出力化 ↓ 宇宙物理現象の制御 レーザー推進	X線レーザー・ホログラフィ レーザー・アブレーション ↓ 薄膜やタンパク質の制御 組織の内部加工 材料の加工	レーザーによるロケット 超精密加工 先端医療 ↓ 遠隔操作での加工技術 新しい情報通信技術	高出力化 極端パルス化 レーザー推進 ↓ レーザー・核融合 精密加工 人工衛星や飛行体の推進技術
	放射光	高輝度・短パルス線の生成 電子分光 自由電子レーザー ↓ クォークレベルの原子核の構造	構造解析技術 光の吸収と分光 X線による生体化学反応と結晶成長技術 ↓ 生体反応の理解 物質表面界面の構造・機能の理解	顕微鏡・位相イメージング X線CT 元素分析技術 構造解析技術 ↓ 微小ガンの発見やがん診断 微小・貴重材料の非破壊分析 地球の高効率化の把握	高輝度線源 超短パルス・電子分光 ↓ 同位体分離 同位体元素分析
荷電粒子	重イオン・R1	大強度加速技術 ビーム高効率化技術 超精密加工技術 大量データ処理技術 ↓ 物質の構造・元素の制御の解明 原子核の存在と新構造の理解 とその理解	R1ビーム線材及びその加工 R1 (重イオン) 技術 マイクロビーム技術 ↓ 超精密加工技術 生体物質の制御 通信子交換技術 環境中の光量の制御技術の解明	不安定核データベース R1ビーム高効率化技術開発 R1ビーム線材・付着及びその加工 R1 (重イオン) 技術 マイクロビーム技術 ↓ 原子力エネルギー技術の開発 超精密材料開発 高効率医療技術の開発 ガン治療 医療用レーザー 宇宙空間での電子線照射や生体リ スクに関する研究	大強度加速技術 ビーム高効率化技術 超精密加工技術 大量データ処理技術 ↓ 不安定原子核・重イオン線源 の基本的性質の体系的な理解 と超精密加工技術への貢献 核融合
	陽子 K中 陽子 π 中陽子 反陽子	大強度陽子・中性子線発生技術 ビーム高効率化技術 反応生成物制御技術 大量データ処理技術 ↓ 陽子スピン構造の理解 ハドロン質量生成機構の解明 C/P対称性破れに関する基本パラメータ決定 物質と反物質の理解			

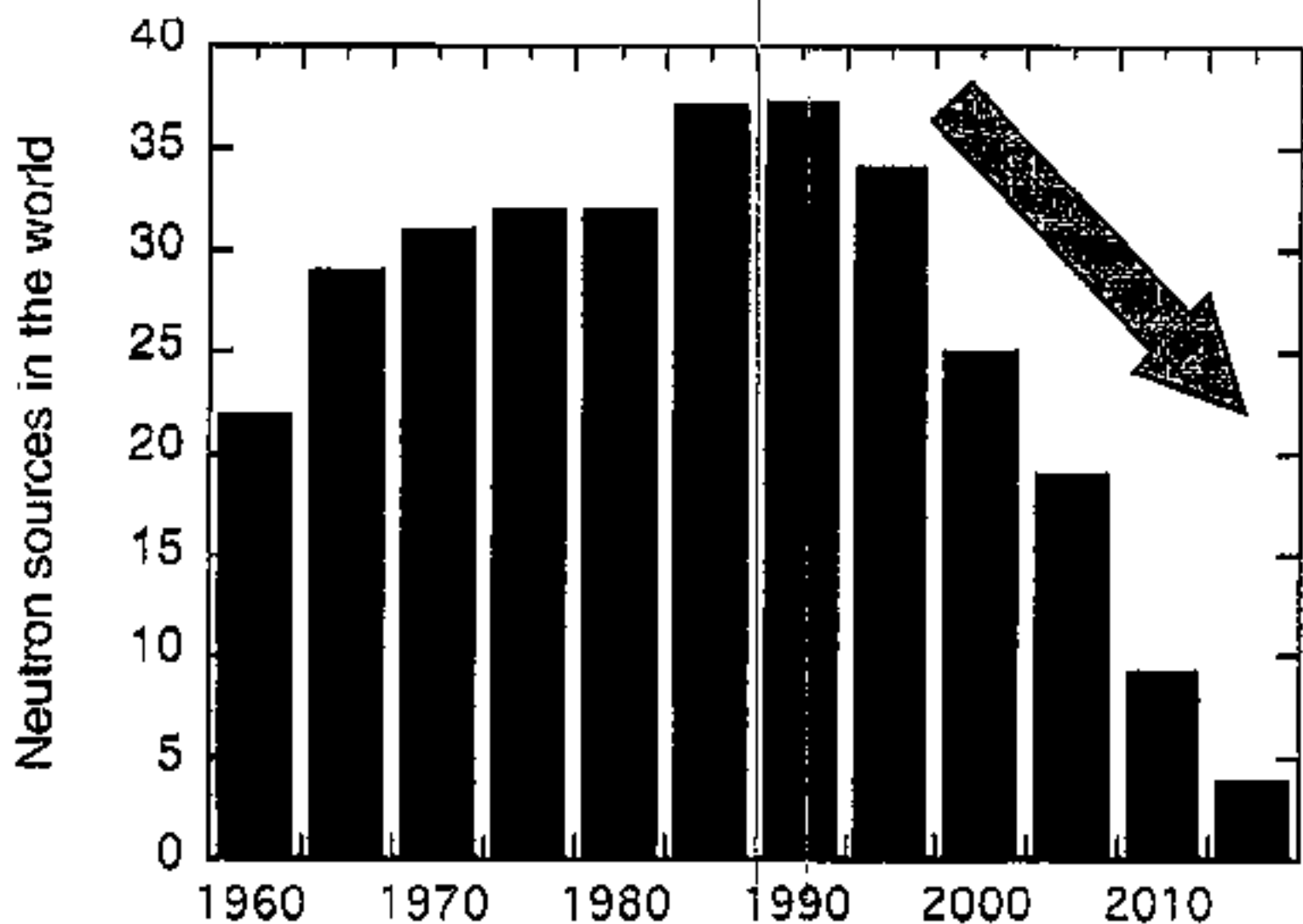
		知的フロンティア (物質の根源)	物質・現象の解明 (基礎的研究)	基盤技術と応用 (シーズ開発)	21世紀の球根技術
電荷粒子	電子	高エネルギービーム生成技術 大強度ビーム発生技術 ビーム変換技術 双粒子の発見 質量の起源となるヒッグス 粒子の観測 CP対称性の破れと物質・反物質	高エネルギービーム生成技術 大強度ビーム発生技術 変換技術 生体の機能 材料改質解析	高エネルギービーム生成技術 大強度ビーム発生技術 変換技術 放射線材料開発 複合金属材料 半導体の改良、超伝導体開発 有害物質除去技術	大強度ビーム発生技術 変換技術 ウランの核燃料開発
	ミュオン	大強度高効率ミュオンビーム発生・変換技術 レプトンの基本的性質の解明	ミュオンスピン法 非破壊元素分析法 物質内部の結晶構造の解析 生体内微量元素や電子伝達機構	物質変換技術 新物質創製技術 先端機能材料の開発・評価	大強度高効率ミュオンビーム発生・変換技術 超伝導反応炉向上化の技術 ミュオン地質探査
中性粒子	中性子	大強度中性子ビーム発生技術 陽子ビーム照射用中性子源の開発 物質の動作の理解 決壊反応等の解析 フラクタル・高分子・非晶体・液体等の理解	中性子線源・照射技術 タンパク質立構解析 超伝導材料	放射線照射技術 高性能材料開発の基盤 ガン治療 腐食性材料の開発	大強度中性子発生技術 中性子源の理解 放射線照射処理システム 微小型IP 核融合炉材料開発
	中性中間子	大強度中性子ビーム生成技術 CP対称性破れに関する基本パラメータの決定 レプトンの基本的性質の解明			
	ニュートリノ	ニュートリノビーム発生技術 ニュートリノ検出技術 ニュートリノ振動の観測とニュートリノ質量測定		経済的なニュートリノビーム源 ニュートリノ検出技術 ニュートリノ通信	経済的なニュートリノビーム源 ニュートリノ検出技術 ニュートリノ通信

		今後の方向性	物質の根源を知る	物質・生体の機能を解明する	より良い生活のための応用を開拓する	新エネルギーの可能性を探る
光	レーザー	超高パルス化・超高出力	○クォークから原子核を理解する	○cDNA高速解析	○公害物質の同定	○レーザー核融合
	放射光	先端放射光源開発	○高エネルギー量子の振る舞い	○タンパク質の立体構造 ○物質の原子配列と機能	○微小ガン発見と高精度CT ○細胞の内部加工 ○ナノ物質の加工	
荷電粒子	重イオン・RI	ビームの大強度化・高機能化	○物質の起源（ビッグバンからの元素合成）	○環境中の元素移動	○耐塩性植物（新機能植物） ○ガン治療 ○画像診断	○廃棄物処理の基礎研究 ○重イオン慣性核融合 ○加速器駆動炉 ○ミウ核融合
	陽子		○極限の原子核	○代謝機能		
	電子・ミュオン		○新基本物質（クォーク・グルーオン・プラズマ）	○遺伝情報の伝達機能		
	プラズマ		○反物質の生成 ○質量の起源（ヒッグス）	○物質の内部構造		
中性粒子	中性子	ビームの大強度化	○自然のCP対称性破れ	○生体物質の立体構造	○新材料 ○磁性体材料 ○ニュートリノ通信	○先進原子力エネルギーシステム ○加速器駆動形減速処理
	中間子		○高温超伝導の起源			
	ニュートリノ		○ニュートリノ振動			
加速器技術 術	実験技術	大強度化 ギ一化、 能化	高エネルギー 高分解 高精度化			

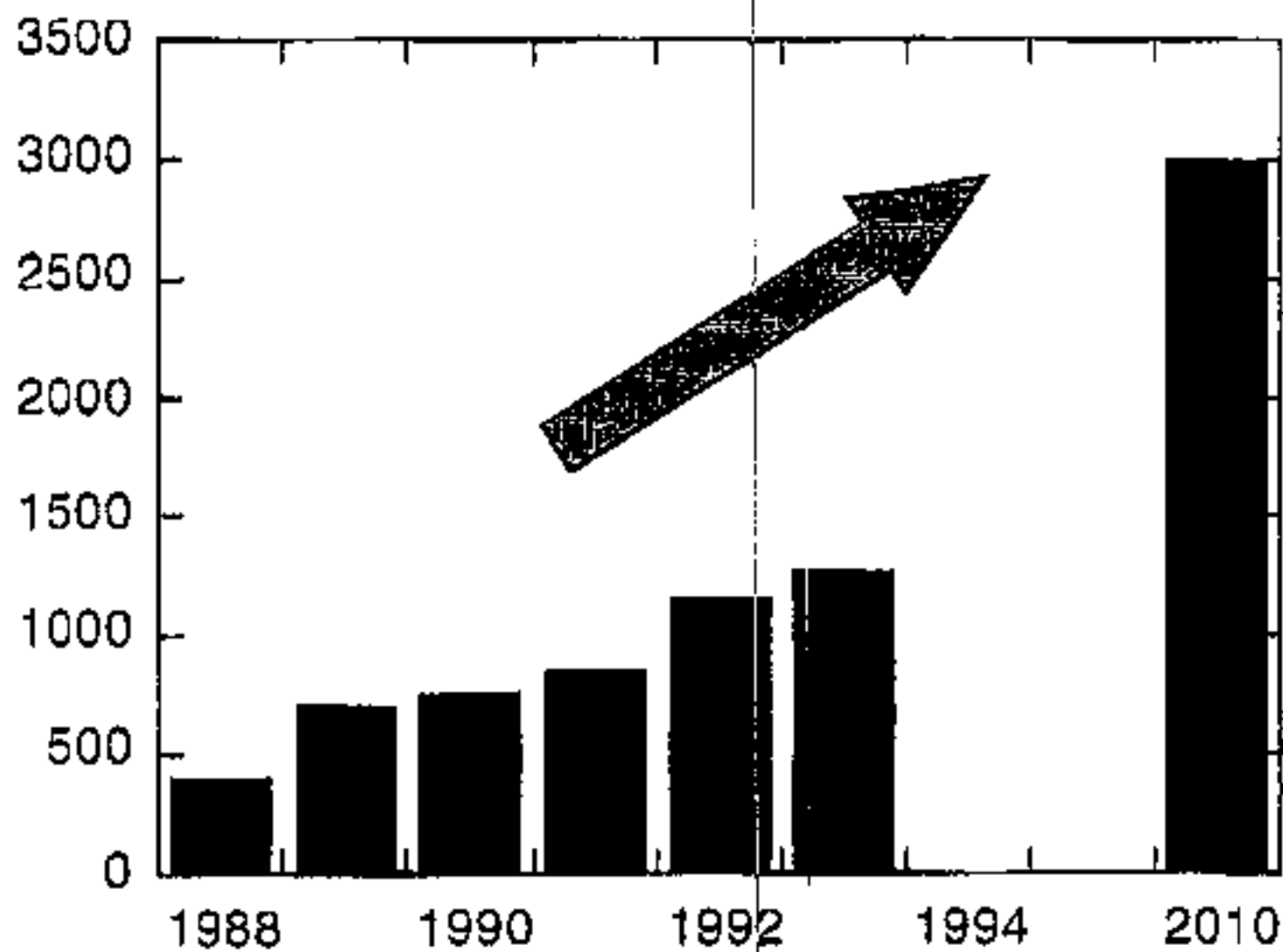
研究用中性子源の発展

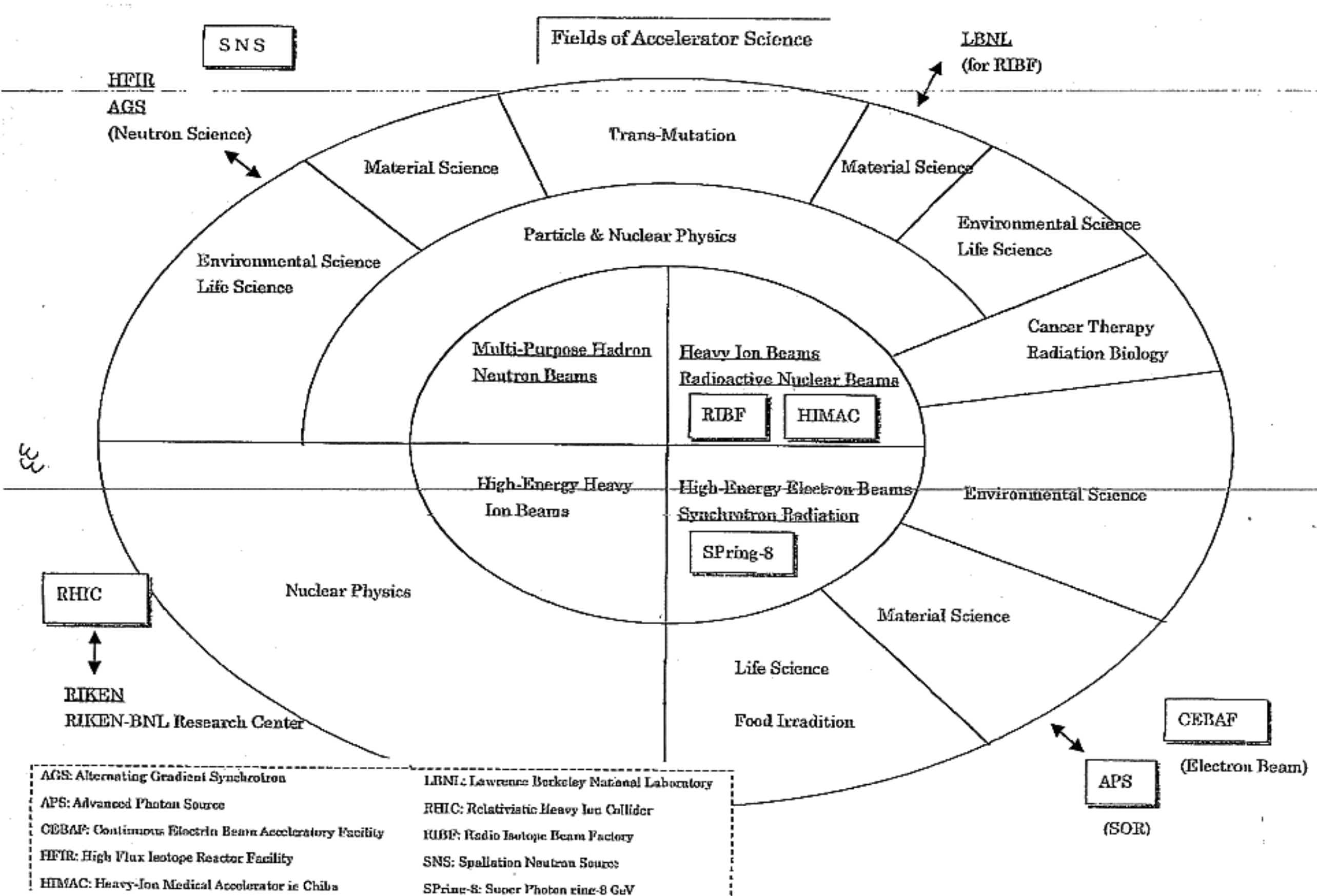


減少する世界の中性子源



増加し続ける中性子科学研究者





原子力委員会

原子力科学基礎研究
委員会

小分野
委員会 A

小分野
委員会 B

小分野
委員会 C

計画 A

計画 B

計画 C

...

計画 D

計画 E

...

計画 F

計画 G

...