

話題(Ⅲ)

中性子科学研究構想について

日本原子力研究所

鈴木 康夫

e-mail: suzuki@felwu0.tokai.jaeri.go.jp

1. 中性子科学研究構想ってなに？

今年の春に、突然に湧き出るように浮かび上がった名前の研究構想であり、それを実施するための組織として考え出されたのが中性子科学研究センターと言う名前である。名前は新しいけれど数年前から、原研原子炉工学部を中心に検討が行われてきた群分離、消滅処理計画（オメガ計画）用の大強度陽子加速器が、原子力研究に利用するだけでなく多くの他の基礎研究分野にも利用できる潜在能力を持っていることから、その可能性を追求してきたうちにたどりついた研究構想である。

オメガ計画では、マイナーアクチナイドを消滅するために、専焼炉方式と加速器炉方式が考えられているが、後者のためには 1.5 GeV、10 mA から 100 mA の陽子リニアックが必要とされている。この陽子ビームは、陽子ビームとしての利用は勿論、ターゲットにぶつけることによって、中性子、中間子、ミューオンそしてスポレーションによって生成される各種イオンを二次粒子として大量に発生させることができる。この二次粒子を原子力研究分野だけでなく他の多くの基礎研究分野に応用できるのではないかと、言うのが中性子科学研究センター構想のそもそもの発端である。陽子ビームとしては、医療関係、特に癌治療、中性子としては、原子力研究関係で消滅処理、新燃料生成、材料照射、基礎研究関係で中性子散乱、回析の物質科学、中性子物理など、中間子、ミューオンとしては、医療や核融合研究への利用などが思いつく。積極的に核変換や核生成のできる加速器の利用を考える人たち、あるいは量子エネルギービームを科学研究に応用しようとする人たち、加速器を新しい科学研究分野を開拓する最適のブルドーザーと考える人たちがたどりついた研究構想である。

このような研究構想を考え、21 世紀の原子力研究の方向を示す研究テーマを作ろうと、昨年に原研内に＜陽子工学センター構想＞検討会なるものが発足した。主として東海研の研究者 40 人程のチームが作られ、陽子工学センターを構成する各テーマについて検討を始め、原研の研究計画の一つの柱になるものとして作業を始めた。当時は、仮にはあったが陽子工学センターと呼ばれていたのである。

今年の春から、平成8年度以降の計画の検討が始まった時に、何故この計画を原研が行うのか、何故、東海研に置く必然性があるのか、どうしたらこの計画を実現できるのか、いままでの研究実施体制や工学主体の研究体制とどう協調できるのかといった議論がおきた。そして、その際に中性子科学という言葉が浮かんできたのである。その背景を理解するには、現在の日本における科学技術研究の戦略についての議論の中で、基礎科学重視、サイエンス指向が大きな流れであることとともに、加速器の技術開発や中性子研究と原研がどう関わってきたのかを知る必要があり、その側面からの原研の歴史を紐解く必要がある。

2. 原研・加速器・中性子

原研は創立40周年を迎える。その40年史の原稿執筆を頼まれ、少しその歴史を勉強する機会を得た。そして、原研が中性子科学研究センター構想、あるいは大強度陽子加速器計画に至った背景には、原研の歴史があるような気がする。原研はその創立当初から加速器の整備に力をいれ、単に原子核の研究だけではなく、放射線照射の影響や材料照射の研究などに力を注いできた。勿論、原研としては、原子炉研究のための中性子断面積測定がその中心的課題ではあり、核データセンターのこの分野における役割は大きいものであったが、なによりも、加速器の効用を単に素粒子物理や高エネルギー原子核分野だけでなく、広く物質科学の研究分野全般に応用するさきがけを担った功績は、大変大きいと思う。

具体的にその歴史を記すと、東海研に最初に設置した大型施設は、昭和32年5月に2 MVバンデグラフ加速器であり、高速中性子源として、核物理以外にも炉物理、炉工学、さらに、電子線を加速して固体物理にも使われるようになった。昭和46年以降は、新たに開発した重イオン源も装着できるようになり、陽子からアルゴンに至る幅広い元素の利用ができる加速器となった。これが原研における中性子科学、重イオン研究の第1歩である。昭和37年10月には、5.5 MVバンデグラフ加速器を設置して、さらに高エネルギーの重イオン核物理研究も可能となり、同時に、より広範囲に研究分野を広げ、より深く根を下ろした研究が進められるようになった。

さらに20 MVタンデム加速器を昭和57年6月に完成させた。これは当時としては世界的に見ても最高の性能を有するもので、重イオン核物理の研究を初めとして、重イオン照射による核融合材料の中性子照射損傷の模擬、プラズマ診断のための原子分子データ測定、放射性廃棄物消滅処理に関連して超ウラン元素の研究、核融合核データ測定などの研究に成果を挙げている。平成6年度には、タンデム・ブースターをタンデムの最後尾に超電導線形加速器を取り付けることによって増力し、4倍の高性能

化に成功している。タンデム加速器は静電加速器で、その原理上加速エネルギーに限界があるため、原子番号約 70 以上のイオンでは、原子核の反応が起きにくくなる、それを補うために作られたものである。このタンデム・ブースターによって、超重核元素の探索、超変形核の研究、高温超伝導材料強化の研究など、多くの先端的な研究に用いられる様になってきている。

もう 1 つの原研における加速器技術開発の柱は、高周波を用いる電子リニアックの開発である。20 MeV 電子リニアックは、原研創立間もない昭和 32 年に電子線照射および原子核研究の目的で作られ 35 年末に完成した。当時の日本としては最新鋭の性能であった。パルス中性子源として飛行時間法による低速中性子断面積の測定研究、制動放射線による放射性各種の生成とその核構造の研究、共同利用等に多大の貢献をした。

昭和 47 年には 120 MeV 電子リニアックを自力で完成させ、最終的には世界的にも遜色のない大電流で、最高加速エネルギー 195 MeV を達成させた。これによる研究は高速増殖炉の開発に必要なウランや分裂生成物の中性子断面積測定を中心に 62 年まで続いた。その後は先端的テーマを取り入れ放射光、陽電子発生技術、自由電子レーザーの研究に用いられた。

リニアックの開発や改良で蓄積された経験は大型放射光施設 SPring-8 のリニアックや自由電子レーザー用超電導リニアックの開発に生かされ、大強度陽子加速器計画ばかりでなく、核融合炉材料の開発用に考えられているエネルギー選択型中性子源（ESNIT/IFMIF）の開発や設計に活用されているのである。

さて、原研における原子力研究は中性子の研究であるということはいうまでもあるまい。原子炉の安全性研究や原子力研究基盤技術全般、さらに研究炉の開発、放射線の利用研究などに力を注いできたが、それらの中を脈々と流れている共通のテーマが中性子についてもっと知りたい、もっとその特徴を生かして利用したいということではなかったか。中性子によるウランの連鎖反応、炉工学における中性子輸送問題、中性子核データについての実験、理論両面からの収集、蓄積努力、そしてさらに、JRR-3M などによる中性子散乱研究など、その利用研究は枚挙に暇がないほどである。

この原研における技術開発の歴史をみると、中性子科学がその中心的課題であると言うことが解るとともに、そのための大規模な研究拠点を作りたいとすることに必然性を感じることができる。その歴史の中で、中性子科学に加速器技術の開発も大きく関わっていることが、また、大強度陽子加速器の開発がこれに大きく寄与できることがよくわかる。

3. 東海研を一大研究拠点に

中性子科学研究センター構想では、大強度陽子加速器と研究炉の利用を中心として中性子科学全般にわたる研究を考え、そのための一大研究施設群を考えている。が、ここでは、研究炉の利用についてはすでによく知られているので、ここに来て新しく出てきた大強度陽子加速器に関わる構想についてのみ記すことにする。

大強度陽子ビームから生成される中性子を初めとする種々の二次粒子は、もともと陽子ビームとともに次の7項目の研究に利用できると考えている。

- (1) 物質科学のための熱中性子、冷中性子の散乱・回折研究
(熱・冷中性子利用施設)
- (2) 中性子(重)照射による材料の基礎研究から開発試験までの広範囲の研究
(中性子(重)照射施設)
- (3) 低・中・高エネルギー中性子反応を用いた核構造、核内核子間相互作用の研究および核データの関連研究
(中性子核物理施設)
- (4) スポレーションRⅠによる超重元素、中性子過剰核、宇宙・天体現象の研究
(スポレーションRⅠ利用施設)
- (5) 長寿命放射性廃棄物等の核エネルギー利用技術の研究
(オメガ・核エネルギー技術開発施設)
- (6) 中間子・ミューオンによる触媒核融合、磁性体、超電導体の研究
(中間子・ミューオン利用施設)
- (7) 中間エネルギーの陽子ビームによる腫瘍の治療、RⅠ製造
(中間エネルギー実験施設)

さらに、これらの陽子ビームの利用施設の概要を描くと図1のようになる。(1)～(7)の研究課題とその意義、期待されるブレークスルーをまとめると表1のようになる。非常に多くの研究課題が考えられるし、その意義も多く考えられ、現在はこの構想をより詳細に練っている状態である。今後は、さらにこれらの内容を深めるとともに取捨選択を行いつつ最適な計画として持って行きたいと思う。と同時に、これらの内容をもっと具体化するための資金計画、体制作り、人材作りを進めなければならないと思っている。

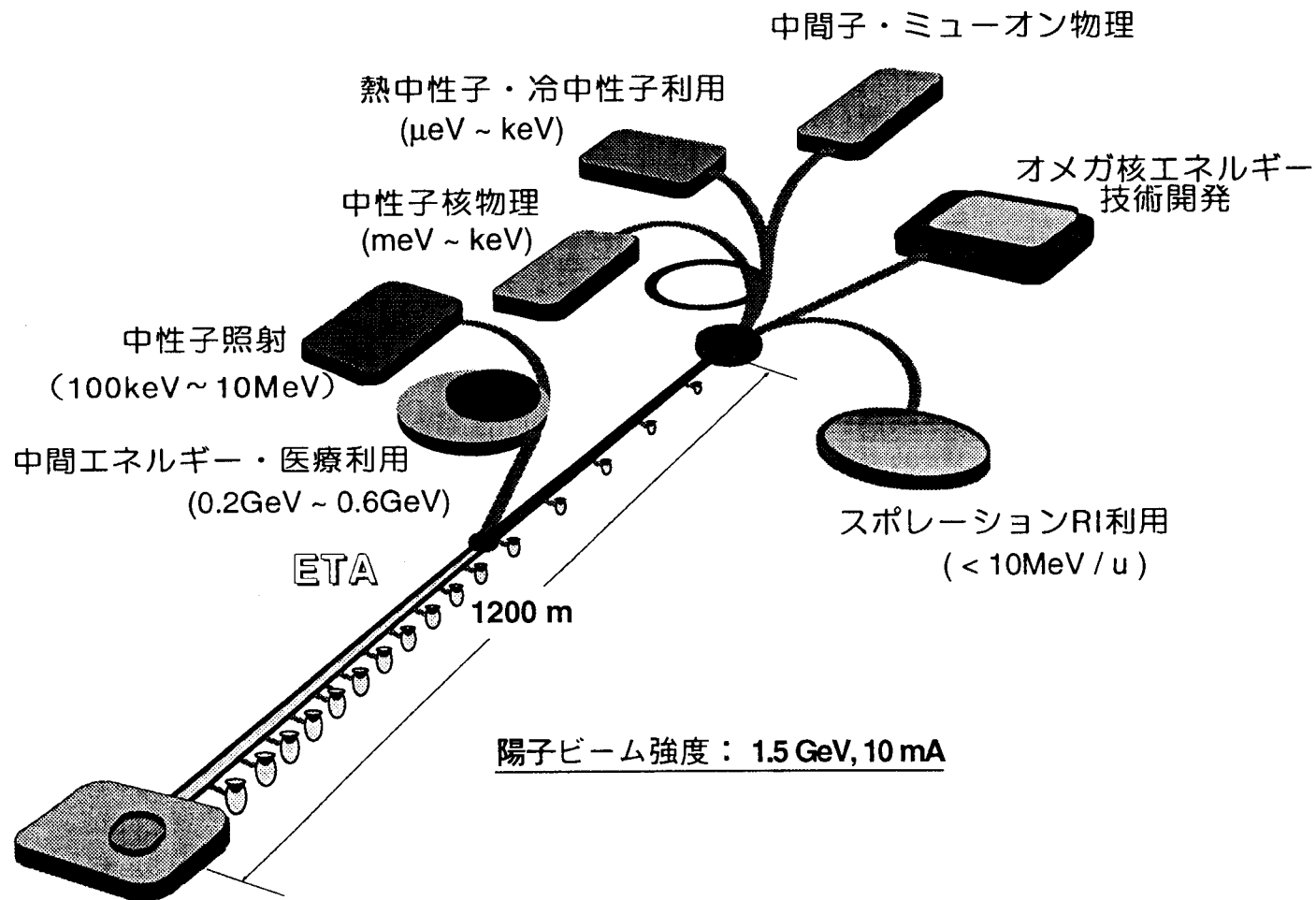


図1 大強度陽子ビームの利用

表 1 中性子科学研究センターにおける研究課題とその意義

平成 7 年 8 月

	分野・課題	意義	期待されるブレイクスルー
熱・冷中性子の利用	物性物理 ・精密構造解析 ・物質内エネルギー励起 ・多元高分子混合系の相転移・相分離 生物物理 ・DNA結合蛋白質の構造 ・中性子ラジオグラフィー ・水素の挙動観察 材料科学 ・アモルファス物質・液体の構造 ・応力分布測定、触媒機能の究明 中性子光学 ・中性子顕微鏡 ・極小核散乱測定技術	新材料評価 物性構造の解明 生体反応機構の解明 新材料評価 大組織観察	世界最高強度のバルス熱・冷中性子源 ・酸化物超伝導体の微細構造・生体物質の水素の動的挙動 原子炉にない特徴 ・高い熱外中性子強度・飛行時間(TOF)法による広範囲(Q- ω)測定 ・過渡現象の実時間スペクトロスコーピー 全く新しい機能のメカニズムの研究が可能 特徴のある中性子工学の研究が可能
中性子(重)照射	材料科学 ・中性子重照射効果(高損傷速度効果) ・核変換導入による物性変化 ・高線量放射線照射下の物性 ・損傷基礎過程 原子力基盤技術開発 ・消滅処理プラント用材料、加速器駆動炉用材料 ・核破砕ターゲット材料の照射試験	耐放射線材料の開発 新材料の創製 高品質ファインセラミックス製造法 高機能材料の開発	既存の施設より 1 桁以上大きい原子弾き出し率 ・均一かつ局所的な高励起状態の創出 ・熱的でないマイクロ運動学的な材料の改質(焼結)技術開発 強力なバルス中性子により過渡現象の実時間スペクトロスコーピーが可能 原子炉にない特徴としてその場試験が容易である。 ・高強度バルス中性子(ピークで 2 桁高い原子弾き出し率)
中性子核物理	meV～GeV 領域核物理 ・核内核子間相互作用、核子・デルタ粒子間相互作用 ・核内核子間相関(クラスター生成機構) ・核構造 ・核分裂メカニズム ・天体核物理(中性子捕獲による元素生成機構) ・基本的対称性の破れ(中性子共鳴におけるパリティ非保存等)	いろいろなエネルギーを有する中性子、陽子、中間子ビームを複数同時に利用し、核物理、天体物理の研究を統一に行う。	既存施設より 1 桁以上量の多い、バルス中性子源 meV から GeV 領域核物理の精密化・核反応理論の統一化 ・低エネルギーから高エネルギーに至る中性子、陽子、パイ中間子測定を同時にかつ系統的に行える。 ・ビームが高強度であるため、放射核種等微量資料での測定が可能 ・バルス中性子源であるため、高分解能、低バックグラウンドでの測定が可能 ・工学、医学、宇宙利用分野で必要とされるデータの高精度化
スプレーション RI	極限領域核物理 ・天体核物理(低速不安定核ビームと原子核の反応機構、元素生成機構) ・超重原子核の生成 ・中性子過剰核等のエキゾチック原子核の構造 ・核融合、核分裂機構 ・高スピン状態、超変形状態	天然に存在しない原子核を作り、新しい原子核の合成、原子核の形状や安定性の研究、宇宙創世時の元素の合成機構など、核物理、天体物理における研究の幅が飛躍的に増大する。	「極限領域核物理の進展とその広範な応用」 ・低速の不安定ビームが利用可能 →冷たい核融合反応の生起により超重元素合成の可能性が増大。さらに、天体物理、物性物理、生命科学等への応用が可能 ・高強度の陽子により、高強度の不安定核ビーム生成が可能 ・不安定核ビームを用いる様々な応用研究が可能となる。
オメガ・核エネルギー	TRU 消滅処理の工学試験 加速器・未臨界炉からなるハイブリッドシステムの ・炉物理/遮蔽研究 ・燃料開発(高燃焼度燃料ピン) ・材料開発(ビーム入射窓) ・伝熱工学(ターゲットの熱工学) 新核燃料生産の工学試験 ・トリウムを材料とする ^{233}U の製造試験	実用 TRU 消滅プラント実現のための各種技術開発及び実証試験 ・加速器を用いた新型原子炉の研究 ・プルトニウム、TRU をほとんど含まない原子炉の実現の布石 ・ウラン以外の核燃料物質資源の活用	実用プラントで経験すると思われる工学的条件、またはこれに外挿できる規模の工学的条件の実現 ・従来と比べエネルギーの高い中性子の原子力への利用。 ・加速器炉の有効性の実証
中間子・ミュオン	非破壊元素分析 物質の元素分析(ミュオン原子の特性 X 線測定による) ・物質、材料の評価 ・考古学 ・医学診断 微視的な物性研究(μSR 法による) ・ミュオンオニウムによる半導体不純物の水素の振る舞いの研究 ・物質の準安定状態における構造研究 ・量子拡散現象の解明 ・磁性体のスピンドYNAMIX、局所構造 ・超伝導の磁気的秩序の解明 ミュオン触媒核融合(μCF) ・ミュオン分子生成の温度依存性、密度依存性等の研究 ・アルファ粒子とミュオンの付着/離脱の研究 ・重水素とトリチウムの混合系でのミュオン触媒核融合で($d\mu$)から t へのミュオン移行現象の研究 ミュオン基礎物理学 ・原子分子物理(量子電磁気学の検証) ・物質科学 ・核物理 ・超低エネルギーの素粒子物理	非破壊、高 S/N 比で測定できる。 いかなる微視的物性実験手段よりも優れる。 ミュオン核融合反応の解明、ミュオン核融合炉物理/炉工学 ミュオンの特性を利用して科学の質的発展が期待できる。	・ビームの強度、エネルギー幅、ビームサイズが画期的に向上 ・eV～keV の超低速ミュオンの発生 ミュオンオニウムによる半導体不純物の水素の振る舞いやバルス状ミュオンによる構造研究など全く新しい研究ができる。 多量のミュオン生成により、より実証の開発が可能となる。 基礎物理研究に十分なミュオン生成により、より定量的評価ができる。
中間エネルギー陽子ビーム	医学的利用の研究 ・眼の悪性腫瘍の治療 ・肺癌や肝臓癌等の治療 加速器関連技術の開発研究 ・ビームダイナミクス、ビームスビルの研究 ・加速器遮蔽の研究(高エネルギー中性子、ガンマ線) 粒子ビーム利用技術の研究(ターゲット設計、ビーム成形) RI の製造 ・医学診断技術(トモグラフィー)の開発	・臓器温存、機能保持による質の高い社会復帰 ・健康な臓器、組織の被曝を必要最小限に抑えられる。 ・加速器技術に必要な技術の確認及び性能向上のためのデータの入手 ・粒子ビーム利用系の詳細設計に反映できる。 ・高度医療、診断技術の実用化	・治療に最適な陽子エネルギー、電流(0.2～0.6GeV のエネルギー、～0.2mA のビーム電流)、陽子ビーム形状 ・加速器関連技術の研究、開発、性能向上に必要な大電流、高エネルギー陽子ビーム ・核破砕反応による極めて多種類の RI の生成 ・加速器イオン制御技術による無担体(単一同位体組成) RI の製造 ・各種医療、診断に最適な RI の開発

4. 大強度陽子加速器

最近 10 年間の原研は、加速器技術の原子力研究分野への導入によって、より広範囲、より高度の研究へと活性化する過程にあると言っても過言でない。大型放射光施設 SPring-8 の建設、高崎研 TIARA の運用開始を初めとして、東海研にもタンデム・ブースターの重イオンビーム再加速の成功、自由電子レーザーの発振実験の開始、大強度陽子加速器の要素技術の開発や、国際協力で実施されているエネルギー選択型中性子源（IFMIF）の概念設計など、大きく研究範囲を拡げ、より強いエネルギービームの発生を求めて活発な開発研究を進めている。

このような環境の中で、大強度陽子加速器の計画が立案され検討されている。すでに、平成 3 年度から、その入射部の開発に着手し、2 MeV、尖頭電流 100 mA 以上が達成されているが、最終的な目標値は 1.5 GeV、平均 10 mA の大強度陽子加速器であり、その仕様は、現在のところ、表 2 の通りである。

表 2 開発目標と基本仕様

大電流化	最大 10 mA
ビームの高品質化	ビームロス 1 nA/m $10^{-4} \sim 10^{-5}$
信頼性向上	70 % 以上の稼働率
効率化・経済性	50 % 以上のエネルギー変換効率
加速粒子	H^- あるいは H^+
加速エネルギー	1.5 GeV
平均加速電流	第 1 期 1 mA 第 2 期 10 mA
運転モード	CW またはパルス

加速粒子を H^- あるいは H^+ としたのは、大電流化、低エミッタンス化、リング入射効率などを比べ、それぞれの利用計画に有利な方を選択する意味である。

大強度陽子加速器のように大出力、大電流の加速器は、その加速性能の技術開発は勿論のことではあるが、同時に、大出力ビームを安全に取り扱う技術、安定な稼働、効率的で経済的な設計開発が求められている。このような見地から、陽子の速度が光

速度の 50 % を越える高エネルギー加速部には超電導加速器の開発を試みるつもりである。超電導加速器は、上に述べたタンデムブースターや自由電子レーザーなど原研における経験が生かされるとともに、ビームスピンや CW 化、使用電力量などで優れている点が期待されているからである。

原研の大強度陽子加速器が世界の同様な計画と比較して、どのような位置付けになるかを示したのが図 2 である。ここで ETA と記されているのが原研の大強度陽子加速器であり、世界の現存の加速器よりも、一桁以上強力なものであり、世界で新しく計画されている大強度加速器とも遜色ないものである。したがって、この研究開発には相当の技術開発と所内外の研究協力が必要であろう。

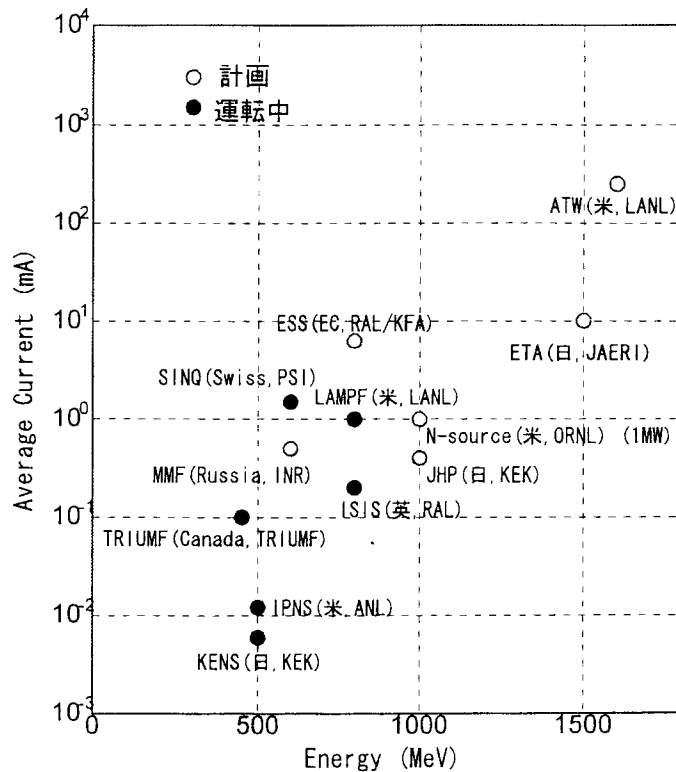


図 2 大強度陽子加速器の現状

現在検討されている大強度陽子加速器の概念図を図 3 に示す。ここでは陽子ビームの加速段階に応じて最適のリニアック加速方式を採用している。その主要部分である高エネルギー部は超電導加速方式を採用し、長さを短くし、建設費の軽減をはかりたいと思っている。従来型の常電導方式よりも、2 倍以上の加速勾配が得られるので、建屋の長さも半分（～ 500 m）になるのではと期待している。

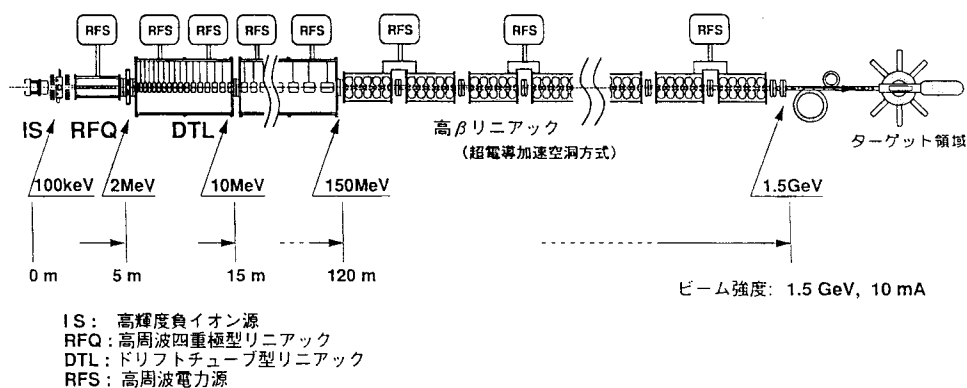


図3 大強度陽子加速器の概念図

5. おわりに

これまで述べてきた通り中性子科学研究センターとは、世界最大級規模の陽子加速器を開発し、それを多くの基礎研究分野に利用できる一大研究拠点を作ろうとする極めて大規模で優れた計画である。国内的には勿論、国際的にも開かれた研究体制とし、しかも広範囲な先端的研究の展開に対応できる利用体制のものとして運営できるようにするべきだと思っている。そしてさらに、中性子科学研究センターを早急に現実のものとするには、原研の所内研究体制の再構築と人材の育成が急務であるとともに、国内外からの研究者、技術者を受け入れ、あるいはこの人達の協力を得て計画を推進して行かなくてはならないと思っている。

中性子科学研究センターを完成させるには21世紀初頭までかかる。その時原研は、いや日本の科学界は、物質科学究明の最強の研究手段であり、互いに特徴を持ちつつしかも相補的役割を持つ定常中性子源（研究炉）、高輝度X線源（SPring-8）、そしてパルス中性子源（中性子科学研究センター）を手にすることができる。

最後に、この中性子科学研究センター構想の検討に積極的に協力してくれる＜検討会＞の諸氏と、特に、この文章作成に資料の提供をして下さった原子炉工学部の陽子加速器研究室（水本室長）と粒子線利用研究室（安田室長）の諸氏に感謝する。