

理研 RIBF 国際諮問委員会の勧告と結論（仮訳）
(2004年11月18日～20日開催)

I. 序

「RI ビームファクトリー(RIBF)」と銘打った放射性同位元素ビーム(RI ビーム)実験施設が理研において建設中である。この施設はいわゆるインフライト RI ビーム分離型のものである。RIBF 発生施設として大強度重イオン加速器システムが 2006 年後半に稼動を開始する。このシステムは 3 基のリングサイクロトロンを直列にしたもので、それぞれは fRC (固定周波数型、 $K=570\text{MeV}$)、IRC (中間段、 $K=980\text{MeV}$)、SRC (超伝導、 $K=2500\text{MeV}$) とよばれる。この新加速器システムは既存のリングサイクロトロン ($K=540\text{MeV}$) から得られるイオンビームをさらに加速して、軽イオンで $440\text{MeV}/\text{核子}$ 、重イオンでも $350\text{MeV}/\text{核子}$ までのエネルギーのイオンビームを発生させる。これらの高エネルギー重イオンビームは超伝導 RI ビーム分離器 BigRIPS において、安定核の破碎反応またはウランのインフライト核分裂によって大強度の RI ビームに変換される。この SRC と BigRIPS の組み合わせは、現在では到達不可能な核図表上の領域にまで我々の原子核ワールドを拡大するであろう。RIBF 実験棟の建設が 2005 年 5 月に完了する。BIBF 基幹実験設備建設計画に計画されている実験設備については優先度を議論中であり、関連して 2004 年 11 月 18～20 日に本国際諮問委員会が開催された。議論の対象にしている実験設備は、ゼロ度スペクトロメータ、大立体角超伝導スペクトロメータ、ガンマ線検出器、高エネルギー RI ビームをガス中に停止させて捕集(ガスキャッチャー)し RF イオンガイドシステムを介して超低速の RI ビームを供給する設備、IRC からの戻しビームラインに接続されたガスキャッチャーおよびシュテルン・ゲルラッハ型スピン分離器からなる低・中エネルギー偏極 RI ビーム施設(現 RIPS の下流に設置)、電子蓄積リング内に自己閉じ込め型 RI イオン標的 (SCRIT) を配置した RI による電子散乱実験装置(RI イオンはウラン光核分裂 ISOL システムから供給される)、等時性蓄積リングと粒子 1 個ごと入射システムからなる稀少 RI 精密質量 測定装置である。RIBF 実験と超重元素探索実験とを同時並行して行なうことができるように RRC への入射用線形加速器を新設する計画も提案されている。RIBF 基幹実験設備の建設は、2006 年度の開始が予定されている。

委員会は理研理事長と中央研究所長からの要請に従って、以下について評価と勧告を行った。

- 1) RIBF の RI ビーム発生システムへの入射系として働くことになる現重イオン加速器システムのアップグレード計画
- 2) RIBF 発生施設 建設状況
- 3) RIBF 発生施設 完成後の初期実験計画
- 4) RIBF 基幹実験設備建設計画での各種「基幹実験設備」と実験計画についての優先順位、科学的意義、コストパフォーマンス
- 5) RIBF 計画が実り多く発展するために必要な人的資源、運営予算、組織、国際協力のありかた、に関する勧告と推奨

国際評価委員会の評価と勧告は以下のとおりである。

はじめに 委員会は、口頭発表を聴きさらに建設現場を視察して、建設中の施設が大きな科学技術的潜在能力をもっており、RI ビーム科学の分野で世界を牽引するセンターとなるであろうことを確と理解した。

II. RIBF の RI ビーム発生システムへの入射系として働くことになる現重イオン加速器システムのアップグレード計画に関して

過去 5 年間に行なったいくつかの増強は、現加速器システムを高性能化している。このことは実施中の研究課題にとって、またより重要なこととして、将来の RIBF への入射システムとしての性能のために有益である。

大強度 RIBF が実現するかどうかは、イオン源の性能にかかっている。既存の 18GHz ECR イオン源は、プラズマ電極とバイアス盤の位置など性能に関係しそうないくつかの技術的パラメータを探って最適化されてきた。系統的な計測で得られたスケールリング則に従えば、このイオン源のビーム強度は RIBF のビーム仕様に対してウランは無理であるがキセノンまでは十分であることを実証している。ウランの目標強度を実現するため 28GHz 超伝導 ECR イオン源を現在設計中である。最近の 18GHz ECR イオン源に関する研究とともに他の研究所における ECR イオン源に関する研究から推測して、将来の 28GHz イオン源が RIBF で目標としているウランビーム生成を達成するものと思われる。

いくつかの改善が、入射用線形加速器に関連して実施された。ビーム通過効率を改善するために新しいソレノイド電磁石が ECR イオン源と分析電磁石の間に据付けられ、横方向ビームエミッタンスと線形加速器の同アクセプタンスとのマッチングが改善された。線形加速器ビームの縦方向の位相の不安定性は、新たに設計した位相コントロールユニットにより除去された。最も重要なことは 6 基の共振器からなるブースター加速部が線形加速器に追加されたことである。これによって非常に重いイオンビームの加速が可能になった。最後段の共振器用 RF 励振器でおこっていた自己励振は補助ダンピング抵抗器により除去された。線形加速器性能の改善は、超重元素探索と 113 番元素発見に成功をもたらした。後述するようにこれらの研究を続けるために、RIBF 用新入射器の整備が熟慮されている。

ビーム加速システムの初段にある AVF サイクロトロンは、ビームの通過効率向上とエネルギーの広がり改善のために改造が加えられ好結果が得られた。基本と第 3 高調波の重ね合わせに基づくフラットトップ加速システムはシングルターン取出しをより容易にするとともに運動量の広がりを $1/3$ に減少させた。またこれは、AVF と後段のリングサイクロトロン (RRC) のビーム通過効率を改善した。

現施設のアップグレード計画が順調に進んでいる。加速器グループは RIBF の性能を確保するために最も重要な装置群 (ビームラインイオン光学、リバンチャー、荷電変換器) を適確に捉えている。しかしながら、委員会は次の 2 つの技術的課題の重要性を強調しておきたい。

- a) 将来 RIBF で 1 パーティクルマイクロアンペアのウランビームを実現するためには、現在の技術レベルを超える高性能の新 ECR イオン源を首尾よく設計製作する必要がある。それはウランビームが RRC を通過させるためには非常に有用で

ある。また、できる限り早期にストリッパフォイル（荷電とビーム品質）のテストをすべきである。

- b) 予定されている最大強度の重イオンビームに長時間耐えられる荷電変換膜の製法を実験的に確立しておく必要がある。クリプトンビームにより回転炭素盤をテストすることが重要であり、温度に関するシミュレーションを同時に行うことが望まれる。15mg/cm² ストリッパとそれがサイクロトロンアクセプタンスに与える影響に関するより多くのビームテストができるだけ早期に実施されるべきである。ストリッパによるエネルギーと角度の広がり問題である。

さらに、RIBF グループは RIBF 実験専用現リングサイクロトロンへの入射用線形加速器を新たに建設することを計画しており、これを基幹実験設備建設計画の予算要求の一部として実現しようとしている。この計画が実現されれば、現リングサイクロトロンへの重イオン入射運転が簡便になるばかりか、現線形加速器を超重元素探査研究に占有できるので、RIBF 実験と超重元素探査実験の両方の実験が同時並行して走ることができるようになる。

III. RIBF 発生施設建設状況に関して

これまでの RIBF 建設の経緯は印象深い。

新 IRC と SRC を収容する RIBF 加速器棟は完成しており、実験ホールと研究室棟からなる実験棟も完成間じかである。

IRC と SRC は製作が終了し現在加速器棟内で据え付けが行われている。磁石の組み立て、低温系、共振系、真空系、配線、ヘリウム供給系配管を含む。冷却と磁石の励磁は 2005 年中頃に計画されるはじめのテストとしてスケジュールされるようだ。また、rf 共振器、真空システムとビーム診断系の組み立ては 2006 年前半に計画されている。運転開始とファーストビームは予定どおり 2006 年の後半に実現しそうである。

BigRIPS の第 1 ステージ用の大口径超伝導四重極電磁石は配置済みで運転試験の準備ができている。詳細な計算機シミュレーションによって 100kW のビームパワーを処理することのできるビームダンパーの構造の最適化が検討されてきている。

SRC のビーム入射用超伝導偏向電磁石が設計製作され試験運転も実施された。これによって技術的に問題視されていた負の曲率をもつ超伝導コイル形状でも所望の仕様を達成できることが確かめられた。2005 年のはじめの磁場測定後、組み立て、配線、冷却と磁石のテストは 2005 年の休止期に計画されている。2006 年の終わりまでに 3 基のサイクロトロンすべての組み立てとコミッショニングを完了するという全体のスケジュールは多少楽観的すぎるものであるかもしれない。SRC セクター電磁石の磁場測定とコミッショニングには予想よりも時間がかかるかもしれない。

BigRIPS の建設と据え付けの進捗はたいへん順調である。

ビームパワーを抑えた数ヶ月の初期運転はビームダンプに必要とされる性能のようないくつかの実際上の制約項目を確かめるためにとっても重要であろう。様々なダンパー位置にビームを当てて様々な反応を知ることが必要である。加えて、2 次中性子

及び荷電粒子による低温部の熱負荷量 や様々な構成物における放射線損傷の実測定がコミッショニング期に計画されなければならない。2次ビームの純度やどの程度イオンごとの追跡が可能かを実際に経験してみることも有益である。弱いビーム強度での運転において実際の電磁石の性能でイオンオプティクスシミュレーションを確認することや校正することも重要なステップである。

ということで、ファーストビームに合わせて BigRIPS を完成させるには努力が要る。特に、BigRIPS のフル装備化と同時期にゼロ度スペクトロメータも据え付ける必要がある。検出器、制御系やデータ収集系を 2006 年に並行して据え付けることも工程をのばす可能性がある。加速器からファーストビームが実際供給されても BigRIPS がそれに対応できるようにするのは難儀であろう。

このような予想される状況を鑑みると、合理的な一連の初期実験計画に焦点をあてた努力が重要であり、最初に行う実験群を早期に決める必要がある。

委員会は現在のメンバー構成では技術的な詳細についてコメントすることが難しい。加速器と BigRIPS の首尾よい運転のために技術諮問委員会 (TAC) を設置することを勧告したい。

IV. RIBF 発生施設完成後の初期実験計画に関して

新施設が稼動開始する時点では、実施するのが技術的にシンプルで新実験システムの最適なパラメータを探ることができ、とはいえユニークな物理的成果をもたらす初期の実験課題をいくつか用意しておくべきである。これらの実験課題はマシンのオペレータと実験家が新しいシステムの特性を知るようになる習得期間中でも有益な結果が得られるだけ十分にシンプルであることが肝要である。初期実験課題のリストが委員会に提出されている。

リストには非常に興味深く、有望な実験課題が含まれている。それらのうち全反応断面積の測定から核半径を決める実験、クーロン励起を用いる研究やインビームガンマ線分光などの実験は、上記の範疇に入るものである。その他の実験課題のうちで強度やエミッタンスなどのビーム性能をより要求するものや、適当な環境のなかでビームを減速させたり停止させたりするものがあるが、これらにはいま少しの開発時間がかかるであろう。さらに RIBF にユニークな実験課題が提案されている。これらの実験課題は潜在的な重要性をもっているが、それらが有効に遂行される前には、徹底的な試験、開発、機器と実験環境の最適化が必要である。この探究と試験のいくつかは、初期段階において実行可能であるが、研究成果が現れてくるのはシステムが完全に理解され洗練された後になるであろう。

財源配分の優先度についての議論を進展させるためには利用できる設備と予算についての慎重な検討が要る。いくつかの初期実験については実施準備ができていない。また、適当な数の他の構想についてもそれぞれの物理の目標の達成に向け実現計画を始めるべきである。

初期の加速器運転計画のなかで提示されたウランビームの強度には幾ばくかの制

限があるものの、たとえば、計画されているクリプトン 86 やカルシウム 48 のビーム強度は非常に強力である。委員会はこのようなビームが実現することを切に願っている。ウランビームの実現に集中することは施設の最終的な性能を達成するために重要なものではあるが、初期実験を運転初期から実現可能なクリプトン 86 やカルシウム 48 ビームなど他所では得られない強力なビームで遂行することを真剣に検討するのも賢いやりかたである。それらは研究計画の初期の段階において新施設に独自の研究の場をもたらす、また、施設の初期稼働から新たな科学的探究のためのすばらしい方法をもたらす。具体的な実験課題としては、核破砕反応での新中性子過剰核の相互作用半径の測定、クーロン励起研究、超重元素探索実験が考えられる。

委員会は、十分詳細に各々の初期実験計画の内容を知るだけの時間がなかったため、それらに優先順位をつけたり、問題点を洗い出したりすることはできなかった。そこで、委員会は簡単ではあるが以下のことを喚起しておきたい。すなわち、初期実験の開始はすぐそこに迫ってきており、そのためにいくつかの実験については資金繰りをふくめて準備万端となるよう早く決断をすべきである。

V. RIBF 基幹実験設備建設計画での各種「基幹実験設備」と実験計画

RIBF 発生施設完成後の実験計画は比類のない成果と新しい物理の知見をもたらすであろう。しかしながら、この施設のはかり知れない潜在能力からすると、基幹実験設備建設計画へのさらなる投資はより本質的な要件である。これらの基幹実験設備が稼働して初めて、世界の先頭を切るこの研究施設が比類なき科学探究の場を十二分に提供することとなる。

1. SAMURAI (7)

大口径超伝導スペクトロメータ SAMURAI(7) [Superconducting Analyzer for Multi-particle from RAdioactive beam with 7 Tm bending power] は汎用のスペクトロメータで、基幹実験設備として装備される。この実験設備は RIBF のもつ甚大な物理の潜在的知見を引き出すであろう。このスペクトロメータは立体角と運動量両方で大きな広がりをもつ散乱粒子を捉える必要のあるいくつかの原子核実験研究用に設計されている。また、その汎用性は研究のテーマによってスペクトロメータの配置を変えることができ、また各種の補助装置を付加できるような設計になっていることにある。最も多用されると思われる配置では、約 50msr の大立体角をカバーし 300%の運動量 アクセプタンス(重い核破砕片から陽子までを捉える)をもつ。このとき運動量分解能は 1/500 と適度である。さらに質量数 100 より小さい粒子に対してその粒子識別が可能である。この適度な運動量分解能は不変質量法や質量欠損法を用いるのに十分である。しかしながら、偏極重陽子ビームを用いる場合、このスペクトロメータを Q3D という高分解能モードにするならば、1/3122 という高運動量分解能をもたせることもできる。ただし、このとき、縦方向、横方向、立体角のアクセプタンスはそれぞれ、 $\pm 30\text{mrad}$ 、 $\pm 60\text{mrad}$ 、 9msr に制限される。

SAMURAI は回転台上に設置され、いろいろな配置が可能のように 0° から 90° まで回転できる。さらに、80cm という大きな磁極間隙をもっていることで、入射核即発

中性子と $\pm 80\text{mrad}$ という大きな角度広がりをもつ重い核破砕片との同時検出が可能である。また、リターンヨークに設けた開口からビームを入射することで、入射核即発陽子と重い核破砕片との同時検出もできるようになっている。これら2つの配置モードは入射核の不変質量の決定を簡便にする。

少数の粒子を同時検出できさらにそれらの4つの運動量を測定できることは、SAMURAIを用いる物理実験の可能性を拡げている。不変質量法を用いることによって軽中重核の1粒子軌道やソフトダイポールモードの研究ができるほか、新星や超新星での爆発的要素合成など、天体核物理に関連する p^- と sd^- シェルでの放射性捕獲反応率についての情報を得ることができる。これらの反応は仮想光子源としてはたらく重い標的核によるクーロン分解でひきおこすことができる。SAMURAIでは重い核破砕片は、入射核即発陽子（陽子過剰核に対して）または、前方に飛び出す入射核即発中性子（中性子過剰核に対して）と同時検出される。ここで中性子については前方に配置される高効率中性子カウンターアレイで検出される。この実験機器配置はこの種の測定での理想型である。

逆反応を用いて陽子、重陽子、アルファ粒子による弾性、非弾性、ノックアウト反応実験をおこなうとき、すなわち、陽子、重陽子、ヘリウムを標的とし重い核が入射ビームのとき、質量欠損法が用いられる。反跳した軽い標的核は半導体検出器で検出される。これによって残留核の励起エネルギーをたやすく求めることができる。この場合、SAMURAIは重い入射核破砕片を標識するために用いられ残留核の崩壊を研究することができる。

2体や3体力とそれらのスピン依存性の研究は偏極重陽子による偏極分解能とスピン移行量の測定で行われる。この研究のためには、SAMURAIはQ3Dの高分解能モードで用いられる。また、大きな磁極間隙にはTPC(time-projection chamber)検出器を設置することができ、これによって重イオン衝突による多重核破砕反応での π^+ と π^- の生成比のアイソスピン依存性を 4π で測定できるようになっている。この実験データは核物質の状態方程式の非対称エネルギーについての情報をもたらす。

SAMURAIが、自身でいろいろな配置をとれたり、各種の装置を配置できたり、標的領域に検出器のための十分なスペースがとれるように設計されていることによって、多様な先端的研究目標を追求するために多用されることになると確信する。このスペクトロメータはまちがいなくRIBFの働き頭になるであろう。その多様性と汎用性から、技術的に問題がなければ、どのような調整、支援によってうまくつかいこなすかという問題が生ずると思われる。これらについてリストアップし検討する必要がある。

要約すると、このスペクトロメータによって、RIビームによる広範かつ興味深く挑戦的な物理研究実験が簡便に実現できる。カバーする範囲は、クーロン分解反応を用いる天体核物理研究から、弾性散乱、ノックアウト反応を用いる核物理、さらには少数多体系の物理の研究におよぶ。

2. SHARAQ

核構造を究めると称する核物理研究施設はすべからく高分解能スペクトロメータを建設すべし、である。RIBF 基幹実験設備建設計画で建設予定の運動量 分解能 $1/15000$ をもつ高分解能 SHARAQ (Spectroscopy of HAdron System with RadioActive Quantum Beams) はこの要請に応える設備といえる。この実験設備の導入によって質量 欠損実験すなわち極めて高い励起エネルギー分解能が要求されるような核構造研究が簡便にできるようになる。

RIBF で供給される高品質の RI ビームのエネルギー領域は 100MeV /核子から 400MeV /核子の範囲にある。このエネルギー領域では核子間相互作用のスピン・アイソスピン項がスピン項とアイソスピン項の寄与を上回り、また一方、核子間相互作用の中心項は極小になって吸収や歪曲の少ない核の透明度の高い領域となる。それ故、SHARAQ を設計し建設することになる東大グループは核子間相互作用のスピン・アイソスピン項が優勢なことに強く影響をうける核構造の問題に答えることになる。特に、小さい Q 値をもちそのためにほとんど運動量 移行のない RI ビームを用いた二重荷電変換反応の研究には威力を発揮するであろう。二重荷電変換反応の研究は安定核ビームを用いてはできない。というのは安定核ビームでは通常二重荷電変換反応に対しては大きな負の Q 値をもってしまふからである。 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ や ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ を標的とする(${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Be}$)のような発熱型の二重荷電変換反応を用いれば、 $3n$ 、 $4n$ などの中性子多体系や ${}^6\text{H}$ 、 ${}^7\text{H}$ などの重水素系の研究が可能である。また、(${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Be}$)反応や他の(${}^{18}\text{O}$, ${}^{18}\text{Ne}$)や(${}^{20}\text{Mg}$, ${}^{20}\text{Ne}$)などの二重荷電変換反応を用いれば正負両ベータ崩壊について二重ガモフテラー巨大共鳴の研究が可能となる。これは二重ガモフテラーの遷移行列要素についての極めて貴重な情報をあたえる。

二重荷電変換反応の断面積は十分大きいので、これらの反応は妥当な実験時間で研究できる。しかしながら、(${}^{18}\text{C}$, ${}^{12,10}\text{C}$)、(${}^{14}\text{Be}$, ${}^{7,8}\text{Be}$)、(${}^8\text{H}$, ${}^{4,3}\text{He}$)などの多中性子移行反応で r 過程上の中性子過剰核種の質量 を測定しようという提案は、確かに天体核物理では重要な測定ではあるが、断面積があまりに小さいので困難であろう。ということで、まずは中性子多体系、重水素系、二重ガモフテラー状態の研究を進めるべきである。

要約すると、このスペクトロメータは、運動量移行の小さいエキゾチックな核反応を高精度で探究するための興味深い実験装置である。このスペクトロメータによって二重荷電変換反応での中性子多体系の研究や二重ガモフテラー状態の研究さらには r 過程核種の質量 の精密測定などが可能になる。核構造を究めると称する核物理研究施設はすべからく高分解能スペクトロメータを建設すべし、である。

3. SLOWRI

SLOWRI は BigRIPS の後続のビームラインの 1 つに設置される。この実験設備は低エネルギーの RI ビームを供給するためのもので、低エネルギーの RI ビームを用いて主にエキゾチック核種の基底状態についての高精度測定が行われる。高精度測定の対象は質量 、電磁モーメント、荷電および価中性子の半径、角運動量、核物質表面

である。

SLOWRI に接続される測定装置としては、多重反射型飛行時間質量スペクトロメータ、共線型レーザー分光装置、超微細構造分光装置、崩壊分光装置が提案されている。また、他所でつくった反陽子を可搬型のトラップにつめて理研に持ち込み SLOWRI のトラップにつめかえて反陽子放射性原子の研究をしようという冒険研究も提案されている。

委員会は低速あるいは停止したエキゾチックで短寿命の同位体に関する実験計画は基幹実験設備建設計画の重要な研究項目であると考え、理研の SLOWRI グループによってなされたイオン捕集技術の革新的な開発成果はこのグループが世界的な牽引チームのひとつであることを物語っている。この設備がもたらすと期待される物理の成果は極めて重要なもので、それは精密質量測定、レーザー分光だけでなく天体核物理実験のための RI ビームの再加速の可能性までを含んでいる。

大学の小研究グループがこれによって極めて重要な成果をあげる可能性が高い。実験計画への参加を国際的に推奨したい。

イオン操作の分野で急速な開発が進んでいるので、それらの装置を追加できる可能性を残しておく必要がある。特に、ペニングトラップ法の最新の開発は注意深く活用すべきである。

他に例をみない RI ビームの生成能力によって RIBF は数年この分野で比類のない RI ビーム施設となろう。それ故、SLOWRI を早期に装備することが重要である。

4. SCRIT:電子と RI の散乱実験

電子リングの一部分にミラー静電場と周回する電子ビーム自身で RI を縦横に閉じ込めて標的 (SCRIT) とし、これによって電子と RI の散乱実験をして不安定核の電荷分布と構造の研究をするという提案は非常に革新的で、斬新で、かつ大胆である。この方式で核の荷電分布の半径とすみだしの程度を決定できるだけの十分な衝突効率が達成できることを実証してみせる必要がある。

5. 偏極 RI ビーム工房

主に 2 つの研究課題が提案されている。

- 1) 新施設 RIBF で生成される非常に多くの RI 核種の核特性、特にモーメントを測定する。
- 2) 核特性の分かっている偏極した RI を要は凝縮系の中の核プローブとして利用して、特にその表面、界面やナノ構造物質を調べる。

核特性

原子核の測定技術はよく知られており、理研ではすでに多くの事象について用いられている。RI の最先端の生成技術を十二分に活用するために、特殊な測定技術の開発が進められており、また一部は試験段階にあって将来有望である。

核物性物理

偏極 RI ビーム工房は将来の機能性材料開発へ向けてのサブナノスケールでの基礎研究に対して世界的な未曾有の研究の場を提供する。

現在そして近い将来、ナノスケール物質は科学と先端技術の応用分野で大きな役割を果たす。これから20-50年以内に、50年前のファインマンの有名な予言が真実になると思われる。すなわち、1個の原子がメモリーやスイッチやセンサーの構成部品となった機能性材料が実現される、ということである。

これが実現するためには、歴大な基礎研究、すなわち例えば表面、界面のような明確で再現可能な場所で孤立した原子群がどのようにそれらのおかれた環境と相互作用するかを研究する必要がある。

非常に多様なRIを生成できるというRIBFの性能、それはすなわち欲しい特性をもつ核種を自由に選択できるという性能であるが、この性能と核物性物理の最先端の実験機器を組み合わせれば、RIBFはこの分野で世界的に先導的な位置を占めることになる。従来の半導体物理においては、3次元系から、層や表面のような2次元系そしてナノワイヤーのような1次元系へとより小さな構成単位を求めることに努力が払われてきた。表面や界面のような明確な場所に置かれたRIは0次元のクラスター様系という究極の研究を可能にする。例としては半導体や強磁性体表面に置かれた希土類原子の挙動研究などである。

CERNのISOLDEとかTRIUMFのISACのような他の研究所も同様な研究の場を提供しており、いろいろな実験がすでに成功をおさめている。例えば、1平方センチあたり 10^{11} 個のRIを整列した構造で表面上に配置できるとか、さらに、RIがその周りの母材原子群とともにはっきりとクラスター様の構成単位を形成することが分かった。

これらのことを考慮すると、提案された偏極RIビーム工房はRIでの位置での超微細相互作用測定によって物質分析をしながら同時に原子スケールでの物質改質をする場を提供する。

偏極RIビーム工房はまた、ベータNMR、PAD、PAC、メスバウワー分光などの原子核実験技術をRIプローブが導入された物性材料に適用して原子スケールでの物質分析をする場も提供する。提案では、いくつかのRIの例があがっており、それらはSeやOである。

Seは光ボルタ物質CuInSe₂の研究には好材料の同位体であり、この物質は現在日本の筑波など世界のいくつかの研究所で研究されている。SeのRIは表面と界面での局所場の測定を可能にする。そのような測定には物性研究部グループとの密接な協力関係が必要である。

酸素のRIである¹⁹Oは局所表面場を調べるための最も望ましいプローブの1つである。このRIのRIBFでのビーム強度はPAC法を用いる測定に十分である。また、RIBFにおいてのみこの測定が可能である。技術的に実用化された暁にはこのプローブに対する需要は非常に大きなものとなり、おそらく初期のメスバウワー分光時代の⁵⁷Feに匹敵するようになる。

技術的実用化

提案では異なる実験装置をレール上を移動させて標的位置に運び、核特性測定と凝縮系への応用研究をするためのいくつかの技術的な具体例が示されている。ガス捕集器とスピン選択装置からなる原子ビーム装置が核モーメント測定とベータNMRや

PAD 実験用の偏極 RI 生成に使用される。さらに、レーンシステムを利用して、停止された原子を再イオン化して物性材料まで加速輸送することも提案されている。これによって、ドイツの GSI で使われたような**オンライン質量分離器**によるものと同等のことができる。すなわち、FEBIAD 型イオン源中の重イオン標的が単に RI 捕集器に取り代わっただけのことである。すべての他の技術的問題は解かれており、GSI と ISOLDE と同じものを使えばよい。RI は分離されて捕集器に運ばれ、そこから**物性実験設備の一部となる UHV 実験箱中の表面**上に蒸着される。熱エネルギーによって任意の表面上への軟着陸が達成される。表面は界面形成のために分子ビームエピタキシによって覆うことができる。したがって、RI は PAC やメスバウワー分光を用いる研究に対してははっきりした場所に存在する。

環境、材料、化学、産業への応用を目指す全提案が RIBF 計画で発展することを期待する。

6. 稀少 RI リング

破砕反応で生成された未知の原子核の質量を等時性リングと飛行時間分析のできる長基線ビームラインの組み合わせで精密に測定しようという提案である。サイクロトロンのような連続ビーム構造をもつ加速器システムと効率よく充填(入射)するにはパルスビームが望ましい蓄積リングは一般的にはうまく整合しない。しかしながら、入射イオンを 1 個に制限あるいは制御すれば整合しないという条件はなくなる。それ故、提案された方式は、少なくとも 1ms かかる入射サイクルに対応する 1kHz 以下のビーム強度に対しては 100%の効率でうまく機能する。リングへの入射の前に約 200m の飛行距離をとって 10^{-4} の精度で飛行時間を測定してリング内での回転数の不確定さを取り除くというアイデアは簡単で賢明である。等時性リングを用いる長基線飛行時間測定方式がうまく機能することはこれまで GSI において確かめられてきた。しかし、GSI においては 1 周ごとに経過時間を測定するというより複雑な方式になっている。また、GSI においては確率冷却がより進んだ方式として考案されている。提案された方式は興味をそそられるほどより単純であるが、極度に小さいビーム強度に制限されている。一方、RIBF でつくられる安定線からはるかに離れたイオンの数は明らかに制限されており、また、リング入射前に置かれる粒子通過検出とキッカーシステムによって興味のある粒子だけに入射を制限することにもなっている。このことが、この提案にある種の制限を与えているが、長いビーム輸送ラインとリングシステムに必要なスペースと建屋にかかるコストを度外視すればコストパフォーマンスは高く、安定線からはるかに離れた同位体の質量測定には革新的な方式である。

基幹実験設備建設計画への全般的結論

委員会は提案されている基幹実験設備建設計画のすべてが、世界の先頭を切るこの施設の潜在的能力を徹底的に活用するために実現されるべき、重要かつ必要なものであると強く感じている。基幹実験設備建設のための総工費 51 億円は RIBF 建設総工費の約 1 割にあたり、妥当かつ必要な投資である。

VI. RIBF 計画が実り多く発展するために必要な人的資源、運営予算、組織、国際協力のあり方に関する勧告と推奨

VI. 1 組織について

RI ビームファクトリーが和光研究所・中央研究所のグループにより建設中である。RI ビームファクトリーの運用段階において、大型施設の運営をより容易なものにするために和光研究所長の下に直接加速器研究センターを設立するという新しい提案がなされている。このアイデアを委員会は良好なものと受け止めている。新たなセンターは理研内外に透明性をもつものとなることも委員会は指摘する。

提案されたセンターは、加速器部門と原子核研究部門という 2 つの基本的な部門を持つ。これに加え、センター内に連携研究部門という理研では新しいコンセプトの部門が提案されている。これまでの理研加速器施設は外部ユーザーに対しては理研の共同研究員となり使用することだけで開かれてきている。ところが、新しい組織では積極的外部ユーザーグループはこの連携研究部門をとおして理研の組織に束ねられることが可能となる。センターは理論研究を連携研究グループに採り入れることに特段の努力を払うべきである。新たな計画は、大学や他の外部ユーザーによる意義深い RIBF の利用を拡大する魅力的なアイデアである。委員会はこの連携研究部門の追加を支持する。

RIBF の建設期には外部委員による定期的な監督のメカニズムが存在しなかったので、ステアリングコミッティーの採用も重要である。IAC とステアリングコミッティーとの関係は明瞭にすべきである。提案されている組織図に理研の原子核以外の研究グループが含まれていないことを指摘しておく。これに加え広い国内利用者集団との関係が組織図において明確にされなければならない。

RI ビームファクトリーは世界でもっとも透明性の高い研究センターの 1 つになるであろう。それ故、国際的研究集団に特にアジア諸国に開かれた研究センターになるに違いない。この施設を国際的研究集団に公開していく過程は、しかしながら、よく判然とはしていなかった。IAC の会議において委員から提案された考えられる方策としては、中国やインドや韓国といったアジア諸国からの委員を入れた常設委員会を、アジア諸国間の研究協力をより緊密にする仕組みについて定期的に議論するために立ち上げ、新センターに付加することである。いかにもこれは 1 つの例であって、RIBF の国際的な利用方式の確立に向け最大限の努力をしてほしい。

VI. 2 運営経費について

提案された運営経費は約 60 億円である。それらの 1/3 は電力料である。委員会は個々の事項の細部を検討するには時間がなかった。委員会の概括的合意として、提案されている総工費の約 10% の運営費の総額は、はじめの概算としては妥当である。

VI. 3 人的資源について

RI ビームファクトリーに代表される比類のない科学的投資を豊穡なものにするには、相応の水準の人的資源が必要である。この観点から理研はいくつかの努力をしてきている。顕著な例としては、理研は理研構内に東大 CNS を誘致し研究協力協定を締結してきており、さらに最近には東大との学術的包括協定を取り交わしている。また、理研は国外も含めて多くの大学との連携大学院に係る協定を締結してきている。

しかしながら人的資源のレベルは未だ不十分である。我々は関連する大学の利用者コミュニティとともに理研の研究者・技術者スタッフの増強を強く奨励する。

国際諮問委員会を代表して
Sydney Gales
委員会議長