

第5回国際技術検討委員会（TAC） 勧告と提言
（2005年11月17-19日）

2006年2月12日

要約

この技術検討委員会は、理化学研究所 RI ビームファクトリー（RIBF）の建設・運転開始計画および基幹実験設備計画の技術的な面について検討・諮問することを依頼された。委員会は2005年11月17-19日に行われ、三人の委員は、11月20日に行われた SHARAQ スペクトロメータのワークショップにも参加した。

まず、技術検討委員会は、我々の滞在期間中に歓待を受けた。矢野博士および加速器・実験設備を担当するチームに対し、感謝の意を表したい。さらに、委員会開催前および開催期間中に配布された資料の質の高さと詳細な記述には大変感銘を受けている。この委員会開催に合わせ、多くの準備作業が行われたことを高く評価したい。なお、以下には理研から報告のあった全ての項目について網羅的にレビューしていないことを申し添えておく。

RI ビーム発生系施設の最近の進展に対し、お祝いを述べたい。同時に、提案されている基幹実験設備計画の進捗状況も評価したい。世界初の超伝導サイクロトロン SRC の超伝導電磁石6台を全て最高磁場で運転することに成功したことは画期的なことである。SRC は世界最大のサイクロトロンとして着々と完成しつつある。

理研の加速器チームと企業チーム間の連携は、力強くかつ効果的であり、理研と企業との間でやりとりされる高度な加速器関連技術に支えられ、非常に優れた工業製品を生み出す原動力になっている。

RI ビーム発生系の加速器群と基幹実験設備として計画されている実験設備群が完成すると、RIBF はまさに世界をリードする不安定核ビーム施設となるであろう。

次の章では、今後の一助となるよう、全般的な意見、気がついた点、若干の提言をまとめた。その後続く二つの章では、RI ビーム発生系、基幹実験設備計画のそれぞれに対し、詳細な意見等をまとめた。

全般的意見

加速器立ち上げ時にスケジュールされている、主要なサブシステム全てに取り組むと2006年は大変多忙な年になると思われる。立ち上げプロセスの組織運営や順序のより詳細な計

画を練ることがその一助になろう。例えば、よくあるケースとしてRFの立ち上げは、静電インフレクターやデフレクターといった他のシステムの立ち上げと干渉してしまう。

SRCの低温システムで最近起こったことは、大規模システムではよくあることで珍しいことではない。同様に、今後の立ち上げ工程で遅れが生じることもありえるが、これもよくあることである。

ビーム損失の診断系や放射線防御系については、ビーム強度を徐々にあげていく運転開始の段階ではとても重要になり、より詳細な計画があるとよいだろう。例えば、残留ガスが電子を剥ぎ取るためにビームが損失するが、この種のビーム損失を立ち上げ時に注意深くモニターして機器の放射化を避けた方がよい。

3台の新しいサイクロトロンRF系については、フラットトップに適應したRFを含んでおり、大変良い仕事が行われている。RRCにフラットトップ機能を追加することもよいアイデアである。

静電インフレクターやデフレクターの動作範囲は、これまでの経験の範疇にあり、立ち上げ時には大きな問題とはならないと考えられる。

ウランおよび他のビームで用いる18GHz ECRイオン源の現在の性能は、既に運転開始に必要なレベルにある。

ビーム強度当たりの放射線量は軽いビームになればなるほど低くなり、Krよりも軽いビームについてはマイクロアンペア以上のビーム強度が出せるはずで、ビーム強度表を更新することを薦めたい。軽いビームについても必要なシールド量を計算しておく、強度表を作成するとき利用できるはずである。

基幹実験設備として現在、計画・設計されている設備群は原子核科学の最前線で裾野の広い実験プログラムを可能にするために必須のものがある。また、基幹実験設備はRIビーム発生系の能力に見合っており、多くの研究成果が期待できる。

技術検討委員会は、このプロジェクトに必要な予算やマンパワーについての評価を任されていない。従って、これらの案件については以下でコメントしない。しかしながら、RIBFの立ち上げや運転・運用を今後進めるには、理研内により多くの定年制スタッフが必要である、との印象を持った。

RI ビーム発生系の個々のコンポーネントに対する意見

fRC

fRC の磁場をチェックするため最終磁場マップ測定が進んでいる。運転開始は円滑に行われるであろう。

IRC

IRC は基本的に完成し、運転開始の準備も整っており、満足のいくレベルにある。

SRC

SRC の 6 台すべてのセクター磁石を運転することに成功しており、お祝いを述べたい。セクターと磁気回路の全体的なデザインは大変革新的で妥当なものである。低温系コントロールデュワーに生じた真空漏れの原因を解析し、修理するのに多少の時間が必要かもしれない。この時期に他のサブシステムの立ち上げを進めることができるので、全体としての遅れは許容範囲に収まるはずである。

SRC セクター磁石のメインコイルと超伝導トリムコイルを初めて励起し、最大磁場まで到達できたことは、大きな成果である。また、鉄とコイル間の相対的な初期の位置決めは既に満足のいくレベルにある。種々のコイルサポートに生じる力を解析することで、コイル位置の微調整を行うことができるだろう。鉛直方向のコイルの位置調整は、最高エネルギーでの加速が成功するかどうかを決める重要なポイントであり、良い位置決めが求められる。動径方向の磁場成分を必要な精度で測定することは簡単ではないので、ビームの鉛直方向の動きを見ながら、補正をする必要があるだろう。

SRC セクターの磁場測定装置は現在準備中である。

RF 空洞が設置される場所には無視できないレベルの磁石周辺磁場が存在しており、この磁場が RF の調整および調整プロセスにある程度の影響を与えるかもしれない。

低温系

BigRIPS の三連四重極マグネットに採用された冷却システムは妥当なものである。三連マグネット STQ1 - STQ5 用の、冷凍機を用いた冷却システムには、放射線による熱負荷を補償するために 300W の余裕があり、一次ビーム強度で決まる熱負荷に対し十分である。

SRC セクター磁石を冷却することに成功したことは、このプロジェクトにおいて画期的なことである。冷凍能力と熱負荷に関する報告があったが、冷却能力には十分な余裕があっ

た。SRC 低温系で真空漏れが起きたが、このような大規模システムを立ち上げる際には珍しいことではない。

ビーム損失モニター系とインターロック系

ビーム強度が強い場合、ビーム損失の割合が少なくてもその損失が局所的であると機器を壊すことがある。従って、加速器系のいたるところでビーム損失をモニターすることは、施設の安全な運営を行うために必要不可欠である。ビームエネルギーが高い場合には、ビームパイプの外側で電離放射線量を測定し、診断すればよい。これは PSI や他の研究所で用いられている方法である。エネルギーの低い場合には、GSI で開発されているように、複数の箇所では非破壊方式の電流測定を行って、ビーム損失を調べる必要があるだろう。ビーム損失が極めて大きい場合に備えて、モニター系と高速インターロック系とを組み合わせ、完全にビームを遮断するのではなく、むしろビームのデューティファクターを下げることによってビーム強度を弱くするシステムがあるとよい。こうすることで、ビーム強度の低い状態で常時ビームを調整することができる。

真空系

サイクロトロンやビームラインの内部での荷電交換過程によってビーム損失が起こると真空が落ちる。真空に対するこの効果が雪崩的に進むとビームの輸送効率が過度に制限される可能性がある。サイクロトロン内部では、加速すべきビームの Q/A 比に近い比を持つ、別のビーム成分が存在しても似た効果を引き起こす。この効果は特に RRC で顕著になる。その理由は、RRC の q/A に対するアクセプタンスは RILAC に比べ小さく、下流の加速器に対して RRC はフィルターとして機能するからである。IRC と fRC については、ビーム入射系での q/A 選択能力は 1% よりも良いので、重いビームに対しても電子剥ぎ取り過程で生じた隣の荷電状態を取り除くことができる。

荷電状態ストリッパーの技術開発

技術開発の優先順位の高い項目として、ストリッパーの問題が認識されていることに満足している。様々な運転モードに要求される種々のストリッパーについて活発な試験研究が行われることに期待したい。種々の薄膜や板に対して、ビームを用いた一様性試験を実施することを提案したい。fRC や IRC への入射に合わせてエネルギーを調節するために、フォイルや減衰板を利用する場合、エネルギー幅とエミッタンスが大きくなることを考慮する必要がある。荷電状態量のストリッパー厚依存性は現在未知のところもあるので、委員会としては、(エネルギー損失も含めて) ストリッパー方式を確立するための試験研究を行うことを薦めたい。挑戦的な課題の一つとして、以下の二つの条件を満たすストリッパーフォイル装置を開発することが望まれる。一つ目の条件は、あるフォイル厚を仮定し、その厚での現実的な荷電状態を与えること、二つ目は、(ウランのような) 重いイオンビーム

の強度が $1\text{p}\mu\text{A}$ のときにフォイル内に生じた熱を散逸させる能力を持つことである。

28GHz ECR の技術開発

先進的な 28GHz ECR イオン源開発の詳細な計画を知り感銘を受けた。この先進的イオン源は、この施設で最大ビーム強度を得るために、特に非常に重いビームに対しては、必須のものである。世界的な観点で、この分野の開発スピードを最大にし、また似たような開発を繰り返さないためにも、諸外国の関連するプロジェクト間で緊密な情報交換が行なわれることを期待したい。

新しい線形加速器入射システム

GARIS 装置を用いた重元素研究開発を継続的に行うために、提案されている新しい線形加速器入射システムは不可欠である。初期の段階から、28GHz イオン源の使用を考慮した設計をすべきである。RFQ やドリフトチューブの常温での加速構造に関して最近国際的な発展があり、これを検討してから最終的な設計選択を行ってほしい。リニアック入口で最善のビーム条件を確実に達成するために、コンパクトな三連四重極磁石の三次元磁場計算結果を綿密に解析した方がよい。

BigRIPS

委員会としては、現在、建設・組立中のイン-フライト型分離装置 BigRIPS は真に世界クラスの次世代装置であり、不安定核を用いた物理学と応用研究に貢献する装置であると確信している。BigRIPS は、複数のエネルギー減衰ステージ（同時に粒子毎に粒子識別をする能力）を持つ最も先進的な分離方式に基づいており、最大 9Tm の磁気リジディティで得られるエキゾチック原子核を最大強度で取り扱うことができる。この装置の大きなアクセプタンスによって、入射核破碎反応やウラン-238 の核分裂反応を最大限利用することが可能である。六重極磁石も組み込まれている。高次の収差のために焦点面が傾くが、六重極磁石をシミュレーションに入れ、この傾きの影響が残る条件の下で、エネルギー減衰板の形状をどのように最適化するのか、その結果を委員会として見てみたいと思う。

多くのチャレンジングな技術開発が成功裏に進んでおり、性能評価の計算結果は BigRIPS のもつユニークな潜在能力を如実に示している。放射能レベルの高い領域には、放射線耐性に優れた偏向電磁石が装備されており、標的およびビームダンプは、きめ細かいコンピュータシミュレーションと現施設でのテスト実験を積み重ねて、準備されている。物質（標的やビームダンプ）にビームが当たった後、その下流にある磁石の超伝導コイルに軽い粒子や中性子が当たり、コイルに悪影響を与える可能性があるため、委員会としては、これらの粒子束を低減するために密度の高いシールドブロックを設置することを薦めたい。放射能レベルの高い場所での装置は、簡単にメンテナンスや入れ換えができるように、でき

るだけ単純な構造にするほうがよいだろう。例えば、水冷式標的に替わる一案として、放射冷却型の炭素標的をバックアップとして用意することも考えられる。このような標的は、PSI で既に用いられており、10 倍以上のビームパワーが標的内で残されている。BigRIPS の初段での主要なメンテナンス方法についてはより詳細なプロセスを練ることが重要になると思われる。また、放射化する前に小規模な装置でテストをすることも肝要だと考える。なるべく早い時期にテストを行うことは重要であり、テストで得た結果を次の高度化に生かすこともできる。

委員会は、BigRIPS 焦点面での診断・粒子識別用検出器をフル装備することは最も優先度が高いと考えている。その理由は、これら検出器が BigRIPS を構成する種々の装置を立ち上げる際に必要不可欠であり、また、不安定核ビームを用いた最初の実験でも利用されるからである。提案されている高計数率対応の検出器は必要とされる分解能を持っており、光ファイバーを用いた最新のデータ収集系は非常に優れた方法である。

RIA や FAIR の破碎片分離装置グループと協力することを薦めたい。分離装置のエキスパートを集めたミーティングが 2006 年 5 月に理研主催のもと開催される。このミーティングでは、次世代分離装置に関する技術的な課題について議論が行われ、国際協力への大きな弾みがつく。

基幹実験設備に対する意見

RI スピン工房

RI スピン工房は、RIBF での研究成果を最大にする方向で考えられた、論理的必然として位置付けられている。また、背後に強力なコラボレーションがあり、様々な興味深い実験プログラムも提案されている。

ビーム共有が実行されるやいなや、RI スピン工房利用と BigRIPS 利用が同時に行われるようになり、同時に複数のユーザーが実験できる能力を RIBF が持つことになる。また、科学的成果の増進にも役立つであろう。

予算規模もそれほど大きくなり、また、大きな問題もなく建設・運転することができると思われるため、早い段階で実行すれば、基幹実験設備整備の初期であっても幅広い科学プログラムを確立することが可能になる。なお、大きなユーザーコミュニティがこの可能性に強い期待を表明していることも述べておきたい。

二者のユーザーが独立にビーム強度を調節する方式の技術開発については将来の課題として取り組むことを薦めたい。

SAMURAI

SAMURAI スペクトロメータは、エキゾチック原子核研究の根幹を担う、と委員会は確信しており、SAMURAI では様々な反応を用いて核物質の研究が行われる。現在、HISS タイプのスペクトロメータが計画されており、大きなギャップと最大磁気リジディティとして 7 Tm の能力を持つ。荷電粒子用飛跡検出器と大型中性子検出器が用いられ、磁気リジディティの解析が行われる。スペクトロメータの最終的な磁石設計は完了していない現時点で、MSU や GSI の関連したグループと交流することを薦める。例えば、三つの研究所の各グループと SAMURAI の強力なユーザーとが一同に会したワークショップは、全ての参加者にとって有益な会議になると考えられる。

GSI の R3B 偏向磁石は、磁石周辺磁場成分を低く抑え、高運動量分解能が得られるように設計されている。理研のエネルギーにスケールすると、R3B 設計の幾つかの点が有用となるかもしれない。一方で、委員会は、SAMURAI は R3B 偏向磁石よりも大きな角度アクセプタンスと曲げ角が必要だと認識しており、従って、R3B 設計をそのまま SAMURAI に転用することはできない。しかし、SAMURAI にも適応できる部分があるかもしれないと考えている。Michael Thoenessen 率いる、MSU の Sweeper Magnet グループと交流することも意味があると考えている。

提案されている飛跡解析系は、要求される分解能を達成するように考慮されている。Super-FRS の高エネルギー施設で計画されているように、スペクトロメータの直後に十分なスペースを残し、より高い分解能が必要な実験にも対応できるようにしておいた方がよいだろう。分解能を向上させる方法としては、補助的に追加する検出器間の距離を変える単純な方法と高分解能スペクトロメータを追加する方法、の二つが考えられる。

SHARAQ スペクトロメータ

SHARAQ スペクトロメータは RIBF で高分解能実験プログラムを行うためにデザインされている。スペクトロメータおよび整合ビームラインのおもな特徴は、このプログラムに要求される分解能等を満たすようになっている。高分解能を実現する際の困難な点は、入射ビームがエミッタンスの非常に大きい二次ビームであることに起因する。エミッタンスが大きい条件で、単色ビームの像の大きさを 1mm にしなければならない。この条件を二次ビームで得るのは恐らく難しいと思われる。なぜなら、上流の BigRIPS で減衰板を用いると、像の大きさが増加するからである。二つの解決策が考えられる。一つは、BigRIPS で既に計画されている飛跡解析用検出器を利用するか、もう一つはビームライン上に目的に合った検出器を製作するか、である。最終的な解決策を得るためには、BigRIPS を含む注意深い軌道計算が必要になる。

この委員会の後の 11 月 20 日に CNS グループ主催の SHARAQ 計画に関するワークショップが行われ、計画の詳細をレビューする上で有益なワークショップであった。3 人の委員 (Geissel、Mittig と Nolen) がこのワークショップに参加した。主要な議題としては、例えば、スペクトログラフと BigRIPS の二次ビームを輸送する分散整合ビームラインの光学設計の詳細であった。CNS グループ、理研グループ両者の役割・責任分担に関することも議論し、明確になった。

SLOWRI

理研では、ガスに粒子を停止させる技術開発および関連する技術開発において先駆的な仕事が行われている。最近の注目すべき成果として、破砕反応で生成した高速ビームを用いて Be 同位体をトラップし、レーザー分光に成功したことが挙げられる。

SLOWRI 設備と提案されている実験装置は、低エネルギービーム実験の様々な機会を提供できるため RIBF における科学プログラムを拡大することになる。低エネルギー実験として、例えば、質量測定、レーザー分光、崩壊実験、さらには再加速されたビームを用いた実験までおよぶ。静電型の飛行時間スペクトロメータを用いた質量測定は、蓄積リングを用いた質量測定に比べ安定線から遠い原子核には至らないものの、大変経済的なりスク

の少ない方法として注目すべきものである。

委員会としては、SLOWRIの実現、関連する技術開発、実験準備が国内外の研究者と共同で行われていることを評価したい。

より強いビームに対応し、ガスセルからの速い引き出しを実現するための技術開発の優先度は高い。次世代のシステムという観点で、サイクロトロン型イオンガイドが将来有望な選択肢として浮上してきた。現存する磁石を使った小規模のシステムか、フルスケールのシステムをただちに開発するか、両者それぞれの労力と性能価値を比較し、考慮すべきと考える。

稀少 RI リング

短寿命のエキゾチック原子核の質量を等時性 RI リングで測定する計画は、RIBF で得られる大強度ビームを基盤にしており、新しい発見を生み出す潜在能力をもっている。目標精度の 10^{-6} は、原子核構造、天体物理、特に r 過程に対し、十分貢献することができる。サブミリ秒領域の原子核質量は、同じ精度を持った他の装置では測定できず、RI リングで採用している方法でのみ測定することができる。委員会としては、提案されているセットアップに原理的な問題を見出せなかった。というのも、似たような測定が GSI の FRS-ESR 設備で首尾よく行われているからである。さらに、輸送ラインで TARN-II リングを再利用することは、経済的なやり方といえる。

粒子を飛行中に識別して一つずつ入射し、またエミッタンス測定により補正をすることができるので、リング内の理想的な等時性領域を有効に利用することができる。ビームがリングに入射する前に横方向の広がりを狭くすることによって、精度と輸送効率を向上させる。非等時性の補正をするために 10^{-4} の精度で飛行時間を測定するが、薄い膜 ($1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度) をつけた TOF 検出器を利用し、エネルギー損失時のエネルギー広がりを避ける必要がある。現在のシミュレーション結果は現実的で、実現可能性を示している。等時性条件は、トリムコイル (多重極成分) で改善・調整される予定で、異なった運動量をもつ安定核ビームでチェックされる。

高速キッカーや 10^{-6} 以下の精度での等時性調整など、いくつかの要素にチャレンジングな技術開発を行う必要がある。

SCRIT

テスト実験では、SCRIT に蓄積されたイオン数は 10^4 程度であった。これは SCRIT システムでの電子散乱実験の迫真性を示している。しかし、現在得られている蓄積イオン数は、

ルミノシティの目標値、 $10^{27}/\text{cm}^2/\text{s}$ 以上、に比べるとやや小さい値である。電子ビームの強度として 500mA が実現できると、必要な蓄積イオン数は 10^7 個以上となる。このレベルに到達するためにはさらに改良を加える必要があるものの、目標ルミノシティが得られなくても、 10^{24} 程度のルミノシティで有益な測定を行うことができる。

不安定核の生成については、 10^8 個/秒程度の ^{132}Sn は、電子、陽子あるいは重陽子を照射してウラン核分裂を起こさせる方法で容易に得ることができる。強い ISOL の建設・整備・運転に懸かる労力を過少評価してはならない。

委員会としては、この方法の開発を今後行うために現在国内にある 2 台の電子蓄積リングのうち 1 台を理研に持ってくるアイデアを支持したい。また、SLOWRI とこの設備を繋げる将来計画もよいアイデアである。この連結なくしては、SCRIT を RIBF の実験エリアに置く理由がない。

委員会は、安定核イオンを用いてこの方法をなるべく早く実証することを薦めたい。

以下の技術検討委員会委員により提出。

2006 年 2 月 12 日

(委員リスト)

Jerry Nolen (ANL : アルゴン国立研究所、アメリカ)

Georg Bollen (MSU : ミシガン州立大学、アメリカ)

Sytze Brandenburg (KVI : グルーニンゲン大学、オランダ)

Bernhard Franzke, (GSI : 重イオン科学研究所、ドイツ)

Hans Geissel (GSI : 重イオン科学研究所、ドイツ)

Kichiji Hatanaka (RCNP : 大阪大学、日本)

Wolfgang Mittig (GANIL : 国立重イオン加速器研究所、フランス)

Hiroari Miyatake (KEK : 高エネルギー加速器研究機構、日本)

Peter Sigg (PSI : ポールシェラー研究所、スイス)