

理研「RI ビームファクトリー」計画

矢野 安重*

RI Beam Factory Project at RIKEN

Yasushige YANO*

1. 計画の概要

RI ビームの発生利用技術は 1980 年代なかばに発明され、これまで安定線から遠くはなれて存在するエキゾチックな不安定原子核の構造を探る唯一の研究手段として世界中で精力的に用いられてきた。その結果、極端に中性子や陽子が多い不安定原子核にはこれまで原子核の基本的性質と考えられてきた「原子核の飽和性（密度一定）」を破るハローやスキン構造をもつものがあることや「殻モデル」が予言する従来の魔法数が魔法性を失い、新たに別の魔法数が出現するなど、これまでの「原子核像の常識」を破る核構造の存在が随所で発見されつつある。これらの異常な核構造までも包括して説明する「新原子核モデル」の構築が求められているところだが、それには、いまだ発見されていない安定線から遠くはなれた原子核を可能なかぎり多種類生成してそれらの特性を調べ、多様な原子核構造の全貌を明らかにする必要がある。

RI ビームファクトリー (RIBF) 計画とは、水素からウランまで全元素の RI ビームを、種類と強度において現在の世界水準をはるかに凌ぐ性能で発生させることのできる次世代の重イオン加速器施設を建設し、「究極の原子核モデルの構築」に挑戦しようとするものである。

本施設の建設は、理化学研究所で培ってきた重イオン加速器建造技術とこれまでに得られた重イオン加速器利用研究（原子・原子核物理、化学、材料、生物、医科学等をカバーする幅広い基礎・応用分野）での成果を結集して進められている。この施設が完成すれば、基本テーマである究極の原子核モデルの構築だけにとどまらず、そもそも原子核はどのようにして生ま

れたのかといういわゆる「元素の起源の解明」といったさらに根源的な研究が可能になるばかりか、「新しい RI 技術による新産業の創出、原子力の基礎基盤技術の拡充」にも貢献することができる。

平成 9 年度に超伝導リングサイクロトロン SRC と超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS を主力装置とする「RI ビーム発生施設」の整備に着手し、現在、平成 18 年度の一部実験開始、平成 19 年度からの共用開始を目指して建設が進められている。また目下、RI ビーム実験用基幹設備の建設予算（平成 18 年度～平成 22 年度）を要求中である。

2. 施設の概要

図 1 に現加速器施設と建設中の RIBF の鳥瞰図を示す。現施設は K540-MeV のリングサイクロトロン (RRC) を主加速器とし、周波数可変の重イオン線型加速器 (RILAC) と K70-MeV の AVF サイクロトロン (AVF) を前段加速器とする世界トップクラスの連続重イオンビーム加速システムになっている。高速の RI ビームを利用する実験設備として RI ビーム分離装置 (RIPS) がある。この装置で加速された高速の重イオンビームから入射核破砕反応によって二次的に高速の RI ビームを生成し、最先端の極限状態の核物理研究を行っている。しかしながら、現施設のもつ加速性能の限界から利用できる RI ビームの種類は質量数約 60 までの軽い元素に限られている。

新施設 RIBF では、K570-MeV 固定周波数リングサイクロトロン (fRC)、K980-MeV 中間段リングサイクロトロン (IRC)、K2500-MeV 超伝導リングサイクロトロン (SRC) の 3 台のリングサイクロトロンからなるエネルギー増幅システムを新たに付加して

* 理化学研究所和光研究所フロンティア研究システム重イオン加速器科学研究プログラム
Accelerator Research Program, Frontier Research System, RIKEN
(E-mail: yyano@riken.jp)

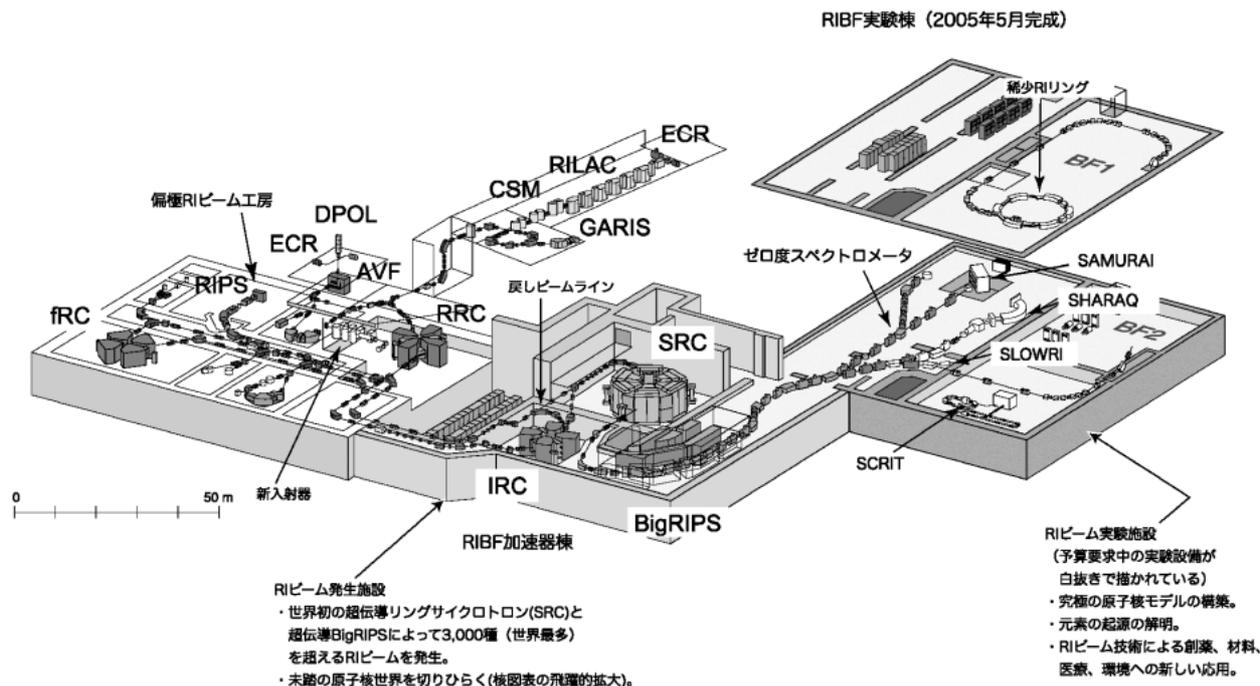


図1 現加速器施設と建設中の RIBF の鳥瞰図

現加速性能を増強し、軽いイオンで 440 MeV/核子、ウランでも 350 MeV/核子まで加速できるようになる。また、880 MeV の偏極重陽子も利用できる。最大ビーム強度の達成目標は 1 pA としている。この強度は現在計画しているビームダンプの遮蔽能力に対応している。SRC から出力される大強度の安定核ビームの入射核破砕反応やウランの in-flight 核分裂反応で得られる RI ビームは、超伝導 RI ビーム分離装置 BigRIPS によって分離収集される。この超伝導 SRC と超伝導 BigRIPS によって現在は未知の原子核世界が広大に開拓されることになる。

現在 3 台の新リングサイクロトロンと BigRIPS の組み立てが RIBF 建屋内で順調に進んでおり、平成 18 年末までにはファーストビーム加速（ウラン、350 MeV/核子、約 10 pA）を予定している。利用者への定常的な共用は平成 19 年 4 月から開始する。

建設予定の基幹実験設備は、ゼロ度スペクトロメータ、超伝導大立体角多重粒子磁気分析装置（SAMURAI）、超低速 RI ビーム生成装置（SLOWRI）、高分解能 RI ビームスペクトロメータ（SHARAO）、稀少 RI リング、偏極 RI ビーム工房、自己閉じ込め RI 標的（SCRIT）を用いる電子散乱実験装置である。また、RILAC による超重元素探査実験と RIBF 実験を同時に走らせるために RRC に新たに入射用の重イオン線型加速器を建設する。

これらの設備の詳細は参考文献 1) を参照されたい。

3. 加速モードと性能

図 2 に RIBF 重イオン加速器の概念構成を示す。図中には、K 値、速度増幅率が示されている。また、図 3 には加速性能を示す。

RILAC には、18 GHz の常伝導と超伝導の 2 台の ECR イオン源をもつ可変周波数型 RFQ が入射器となっており、また CSM（多価化器）という線型加速器がブースターとなっている。このブースターまで使用すると超重元素探査実験に十分な最大 5.8 MeV/核子のエネルギーが得られる。

軽イオン用の入射器である AVF は、14.5 GHz と 10 GHz の 2 台の ECR イオン源と偏極重陽子イオン源を搭載している。また、単独でも東大 CNS の低エネルギー RI ビーム実験装置 CRIB 等で利用されている。

以下のような多様な加速モードがある。

- (1) RILAC + RRC + fIRC + IRC + SRC は 350 MeV /核子（固定エネルギー）の 1 次ビームから BigRIPS で約 250 MeV/核子の RI ビームを生成するモードである。このとき、IRC からの 115 MeV/核子のビームの一部が戻しビームラインを通して現施設の RIPS で使用することもできる。
- (2) RILAC + RRC + IRC + SRC ではエネルギー可

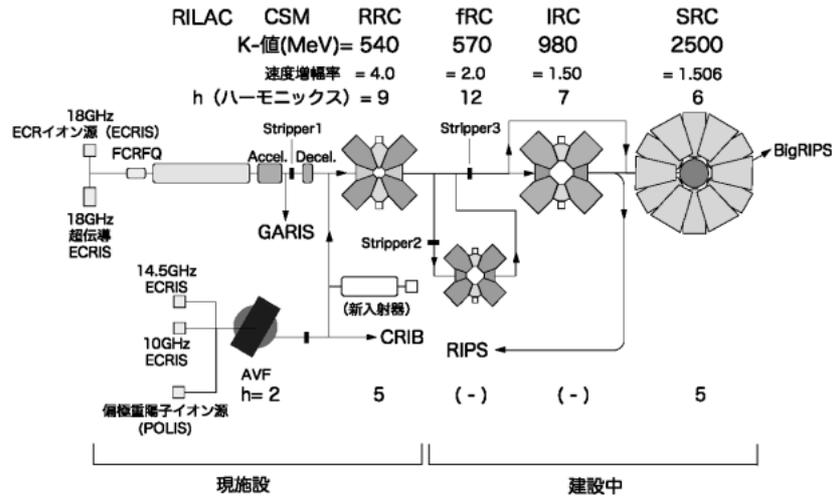


図2 世界最強のRIビームを発生させるRIBF重イオン加速器システムの構成

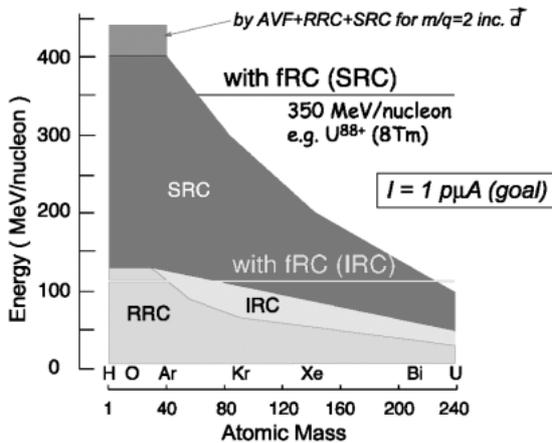


図3 RIBFの加速性能

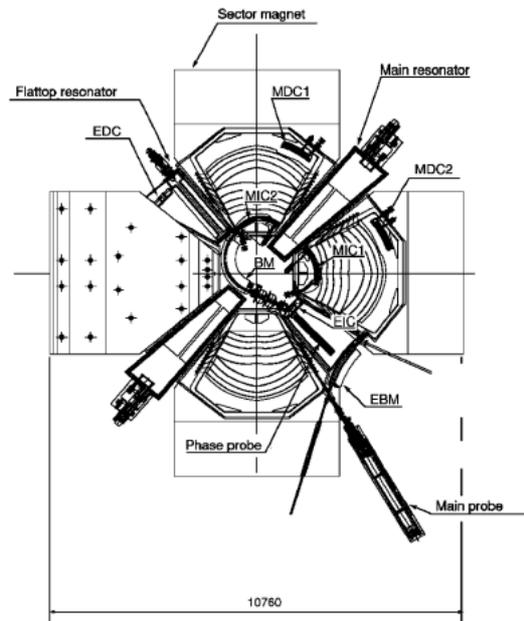


図4 fRCの平面図

変の実験ができる。このモードでも戻しビームを利用できる。

- (3) AVF + RRC + SRCは880 MeVの偏極重陽子ビームを供給するために使われる。この場合のRRC, SRCの加速ハーモニック数は両方5である。この運転モードはRRCの取り出し半径がSRCの入射半径に等しいことから可能になっている。

4. 新リングサイクロトロン

4.1 fRC

図4にfRCの平面図を示す。このリングサイクロトロンは4セクター、常伝導で、建設費を節減するために固定周波数になっている。さらに、等時性磁場を形成するための磁場分布調整範囲を狭くしてトリムコイルの負担を軽減するために、加速粒子の質量対電荷比をほぼ一定にしている。

主要諸元を表1に示す。入射、取り出しエネルギー(10.5および50.7 MeV/核子)は上流と下流での荷電変換器によるエネルギー損失を補償してRRCとIRCとの整合をとれるようにそれぞれ小さめ、大きめにしている。K値は570 MeVで50.7 MeV/核子のウラン238, 71価の磁気剛性に対応する。加速周波数は55 MHzでRILAC, RRCの3倍になっている。これによって小型、低rf電力で高加速電圧の加速空洞が実現している。2台の加速空洞で1ターンあたり1 MVの加速電圧が得られ、十分大きなターン分離が得られる。fRCはRRCの3倍の周波数を使うので位相アクセプタンスを±10度と大きくできるようにフラット

表 1 fRC の主要諸元

K Value (MeV)	570
Energy (MeV/nucleon)	
Injection	10.5
Extraction	50.7
RF Frequency (MHz)	
Main (2 sets)	55
Flattop (1 set)	165
Acceleration voltage (MV/turn)	1
Harmonics	12
Radius (m)	
Injection	1.55
Extraction	3.30
No. of sectors	4
Sector angle (degree)	58
Max. magnetic field (T)	1.68
Total weight of magnets (t)	1,320
Phase acceptance (degree)	± 10

表 2 IRC の主要諸元

K Value (MeV)	980
Energy (MeV/nucleon)	
Extraction (max.)	127
RF Frequency (MHz)	
Main (2 sets)	18.0-38.2
Flattop (1 set)	72.9-114.6
Acceleration voltage (MV/turn)	1.2
Harmonics	7
Radius (m)	
Injection	2.77
Extraction	4.15
No. of sectors	4
Sector angle (degree)	53
Max. magnetic field (T)	1.9
Total weight of magnets (t)	2,720

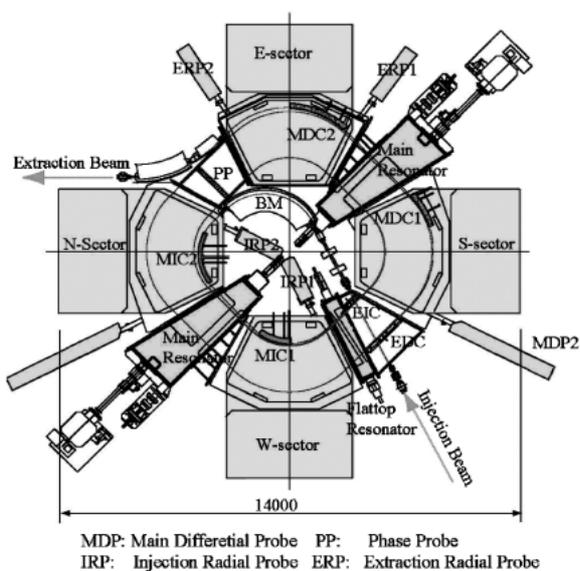


図 5 IRC の平面図

トップ空洞を装備している。

fRC は現施設の磁気分析装置をシャットダウンしてその跡地に配置される。取り出しビームはセクター電磁石のバックヨークを貫通してビームラインに接続する。

4.2 IRC

図 5 に IRC の平面図を、表 2 に主要諸元を示す。IRC も 4 セクター、常伝導で、K 値は 980 MeV と大きい。その前段加速器としては、可変エネルギーモー

ドのときは RRC が、RI ビーム生成用の固定周波数モードのときには fRC が使われる。最大加速エネルギーは 127 MeV/核子である。加速周波数は 18.0 MHz から 38.2 MHz まで可変である。このサイクロトロンも 3 倍の高調波のフラットトップ空洞を装備している。最大のセクター磁場は 1.9 T と高いが主コイル断面をできるだけ大きくして電流密度を下げることによって、0.5 MW と消費電力は比較的小さくなっている。

IRC は製作を容易にするため、RRC の製造技術をできるだけ継承するように設計されている。

4.3 SRC

図 6 に SRC の平面図を、表 3 に主要諸元を示す。SRC の主要構成機器は、6 台の超伝導セクター電磁石、4 台の可変周波数加速空洞、1 台のフラットトップ空洞、入射取り出し装置（うちビーム入射用の偏向電磁石 SMB は負の曲率のコイル巻き部をもつ超伝導電磁石である。この SBM の励磁試験は完了している。）である。SRC の特徴は、セクター電磁石間のバレー領域に生じる超伝導セクター電磁石からの逆方向のもれ磁場をできるだけ軽減するために、バレー領域が約 1 m 厚の純鉄スラブ磁気ヨークで覆われていることである。上下スラブはセクター電磁石の上部と下部を架橋する構造になっており、側面は内部に設置される加速空洞、バレー加速箱のメンテナンス等をし易いように観音扉の構造になっている。この磁気ヨークの総重量は 3000 トンあり、そのため SRC 全体では総重量 8300 トンとなっている。K 値は 2500 MeV で、全体寸法は直径が約 18 m、高さ約 8 m である。

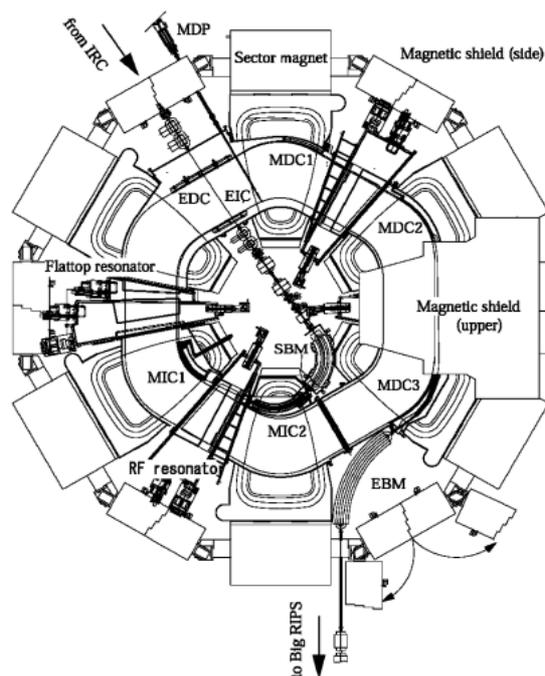


図6 SRCの平面図

表3 SRCの主要諸元

K Value (MeV)	2,500
Energy (MeV/nucleon)	
Extraction (max.)	440
RF Frequency (MHz)	
Main (4 sets)	18.0-40.5
Flattop (1 set)	72.0-121.5
Acceleration voltage (MV/turn)	2.4
Harmonics	6
Radius (m)	
Injection	3.56
(equal to the RRC extraction)	
Extraction	5-36
No. of sectors	6
Sector angle (degree)	25
Max. magnetic field (T)	3.8
Total weight (t)	8,300

SRCは軽イオンを440 MeV/核子，ウランまでの重イオンを350 MeV/核子まで加速できる。

超伝導セクター電磁石の大きさは長さ7.2 m，高さ6 mで，重さ約800トンである。セクター角25度で，最大セクター磁場は3.8 T。この磁場強度は350 MeV/核子のウラン88 価の磁気剛性8 Tmに対応している。セクター電磁石は上下2対の超伝導主コイル（液体ヘリウム浸漬冷却），上下2対4組の超伝導

トリムコイル（2相強制ヘリウム流による間接冷却），上下2対22組の常伝導トリムコイル，クライオスタット，断熱支持機構，ビームチェンバー，常温の上下ポールと上下側ヨークから成る。

SRCは世界初の超伝導リングサイクロトロンで，K値2500 MeVはサイクロトロン史上最大である。バレー領域を鉄シールドで覆った“鉄の塊”タイプは斬新な構造である。これまで世界のいくつかのサイクロトロン研究所ではいわゆる“オープン”タイプの超伝導リングサイクロトロンが検討されてきた。この新構造を採用することで，バレー領域に大きな逆もれ磁場が存在することによる数多くの技術的困難が解消された。また，この構造のおかげで，SRCは自己放射線遮蔽，自己漏えい磁気遮蔽の機能をもつことになりSRCを収容する部屋の構造を格段に簡素化することができた。

5. BigRIPS

図7にBigRIPSと基幹実験設備の配置を示す。BigRIPSの特徴は，2段ステージ構成になっていることである。第1ステージの生成標的からF2焦点までは2回の偏向部をもつスペクトロメータになっており，全体では色消し系である。4台の大口徑超伝導3連4重極電磁石（STQ）と2台の大口徑常伝導偏向電磁石（RTD）からなる。この第1ステージでRIビームを生成し分離する。RIビームの生成には，利用したいRIビームにあわせて適当な安定核の入射核破碎反応やウランのin-flight核分裂反応を用いる。くさび型のエネルギー減衰板を運動量分散焦点F1に挿入し，質量と電荷の違いによるエネルギー損失の違いを利用して，1回目の偏向では分離できない質量対電荷比の同じRIビームのさらなる分離を2回目の偏向で行う（いわゆる分散整合法）。ハイパワービームダンプが1回目の偏向電磁石のギャップ内部に設置され100 kW級の1次ビームを止める。発生する大強度の高速中性子束を遮蔽するためにビームダンプの周辺は約9000トンのコンクリートで覆われる。焦点F3から焦点F7までの第2ステージは8台のSTQと4台のRTDからなっており，4回偏向の色消しスペクトロメータを形成している。RIBFのエネルギー領域では，第1ステージで十分な純度のRIビームにならないので，いくつかのRIビームがまざったカクテルRIビームが第2ステージに送出してくる。そこで，第2ステージでは，粒子ごとに，エネルギー損失，飛行時間，磁気剛性を測定して，その質量，原子番号，電荷，運動量を決め，標識したRIビームを下流

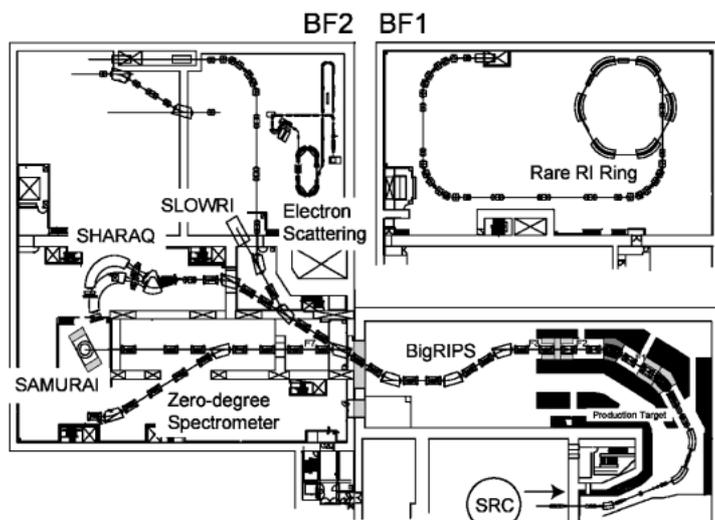


図7 BigRIPS と基幹実験設備の平面配置. 稀少 RI リングは電子散乱装置の上部の地下 1 階に設置される.

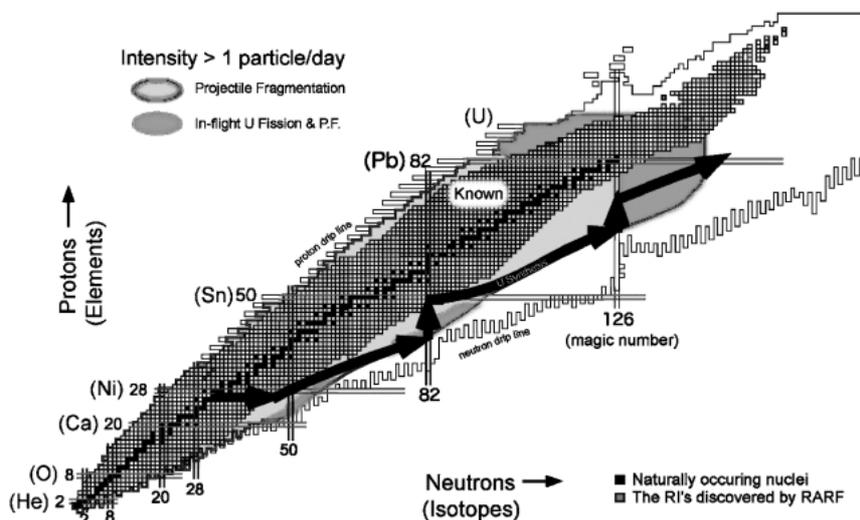


図8 RIBF が開拓する原子核世界 (核図表上で 1 日 1 個以上の領域). 超新星爆発とともに瞬時に生成されたと思われるほぼすべての未知の不安定核種がはじめて生成可能になる.

の実験設備に輸送する方式となっている. この新方式によりはじめて SRC と BigRIPS が生成する RI ビームをほぼフルに実験に供することができるようになった.

BigRIPS の角度アクセプタンスは横 80 mrad, 縦 100 mrad で, 運動量アクセプタンスは 6% である. 最大磁気剛性は 9 Tm で SRC の 8 Tm より大きい. 長さは 77 m ある. 350 MeV/核子のウランの核分裂片ビームの角度と運動量の広がり約 100 mrad, 10% と推定しているの, 核分裂片ビームのほぼ半分を実験に利用することができる. この高効率の RI ビーム収集能力は, 大口径の超伝導 STQ と RTD に

よって達成されている.

RI ビームの強度を EPAXII とよばれているプログラムで予想すると, たとへばニッケル 78 (超新星爆発中でのウラン元素合成仮説で極めて重要な役割を担うと考えられている原子核) を, 現在の世界水準の約 100 万倍の 1 秒間に 10 個という強度で生成できるようになる. 図 8 に RIBF が開拓する原子核世界 (核図表上で生成率が 1 日に 1 個以上の領域) を示す.

参考文献

- 1) Reports on RIKEN RI Beam Factory Project for RIBF International Advisory Committee 2004. 出版予定