

13. サイクロトロンの超伝導化

理化学研究所

奥野 広 樹

目 次

サイクロトロン¹の超伝導化

1	はじめに	13-1
2	MSU の超伝導サイクロトロン	13-2
2.1	超伝導サイクロトロンの誕生まで	13-2
2.2	K500 のコイルの詳細	13-3
2.3	K500 後の超伝導サイクロトロン	13-4
3	理研のリングサイクロトロン?	13-5
3.1	リングサイクロトロンの台頭	13-5
3.2	理研RI ビームファクトリー	13-7
3.3	超伝導リングサイクロトロン(SRC)の概要	13-7
3.4	SRC 超伝導コイルの詳細	13-8
3.5	SRC の長期運転	13-11
4	完全なる超伝導サイクロトロン	13-12
5	まとめ	13-13
6	参考文献	13-14

サイクロトロン of 超伝導化

1. はじめに

サイクロトロンとは、一様磁場中での荷電粒子の回転周期が粒子の運動エネルギーによらず一定であることを利用した円形加速器である。この原理は、Ernest Lawrence によって見いだされ、1932 年に実証された¹⁾。この発明以来、サイクロトロンは、数多く製作され、基礎科学は勿論のこと、RI 製造等の応用分野においても用いられてきた。Fig.1 はサイクロトロンの概要を示すものである²⁾。サイクロトロンでは、ビームを円形に閉じ込めて加速するため、加速器全体がコンパクトになることが利点である。Lawrence と当時彼の学生だった Livingston が最初に作ったサイクロトロンは、4 インチで手のひらに乗るくらいのものであった。その後、要求される加速ビームのエネルギーやビーム強度を増えていくにつれて、ビームを円形に閉じ込めるための磁場も高くなり、その磁場を実現する為の磁石が大きくなる。抵抗ゼロでコイルの電流密度をあげて、高磁場を発生する事の出来る超伝導磁石は、世の中のサイクロトロン開発者にとっては、魅力的な技術であることは間違いなく、実際、超伝導コイルを用いたサイクロトロンは、多数製作されビーム加速を実現してきた。

1970 年代に MSU の Henry Blosser らが初めて作った超伝導サイクロトロン³⁾は、原子核物理学者達の要求に応えるべく様々なイオンを高エネルギーまで加速できる物であったが、コンパクトなものだった。2000 年代には理化学研究所の RI ビームファクトリー(RIBF)⁴⁾において、大型で複数の非円形超伝導コイルを組み合わせた分離セクター型のリングサイクロトロンが世界で初めて製作され、ビーム加速に成功した⁵⁾。このサイクロトロンに要求される磁場は、常伝導磁石では巨大になりすぎて、実現が極めて困難なものであるため、超伝導磁石で製作されたが、直径が 20 m にも及ぶ大型のサイクロトロンである。このサイクロロンが実現されたのは、高エネルギー物理学の検出器⁶⁾や核融合装置⁷⁾で培われた大型超伝導コイルの製作技術が発達したおかげとも言える。

これまで述べてきた超伝導サイクロトロンの超伝導化されている部分は、ビームを閉じ込める磁石部のみであって、ビームを加速する共振器部は超伝導化されていない。文字通り考えると超伝導サイクロトロンは、磁石も加速共振器も超伝導化されていないといけない。また、大強度で高エネルギーのサイクロトロンになると加速共振器の 1 基あたりの消費電力は 1 MW を優に超えるため、省エネルギーと言う観点からも、超伝導キャビティを用いた超伝導サイクロトロンと言うのは興

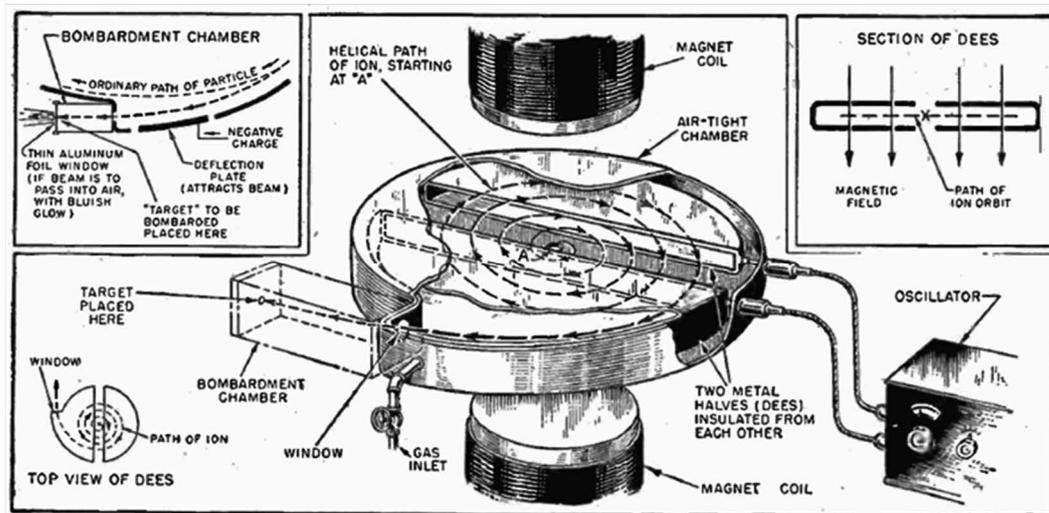


Fig. 1 サイクロトロンの概要²⁾

味深い。実は 1980 年代にミュンヘン工科大学の Trinks のグループは、それに挑戦していた⁸⁾。残念ながら、加速試験の段階でこの Tritron 計画は終わってしまったが、超伝導加速空洞の技術が進んできた現在、このような「完全なる」超伝導サイクロトロンを実現できるタイミングにあるのでは無いかと思う。

現在も、様々なタイプの超伝導サイクロトロンは提案されており、実現に向けて要素技術開発が行われている。高温超伝導体のコイルを使うもの⁹⁾や、「芸術的な」コイル形状により、イオン源から出た陽子ビームをひとつのサイクロトロンで 800MeV まで加速しようと言うもの¹⁰⁾などである。いずれも、サイクロトロンの性能をあげ、よりコンパクトなものを作るという気持ちに変わりは無い。

以下 2 章では、H. Blossor らの作った MSU のサイクロトロン、3 章では理研のリングサイクロトロン(SRC)、4 章では Tritron について述べ、最後に最近設計されている新しいタイプの超伝導サイクロトロンについて触れる。

2. MSU の超伝導サイクロトロン

2.1. 超伝導サイクロトロンの誕生まで

最初に超伝導コイルを用いたサイクロトロンのコンセプトを打ち出したのは、カナダ Chalkriver 原子核研究所の Bigham だった¹¹⁾。超伝導サイクロトロンを最初に作った MSU の Blossor は、1972 年にバンクーバーで行われたサイクロトロン国際会議で、このコンセプトに対して次の様に反論している¹²⁾。“Superconductivity then seems unlikely to make a contribution to cyclotrons in the foreseeable future, primarily because there is no overriding problem which would thereby be solved such as it is the case for synchrotrons and linacs.” Blossor の主な心配は、超伝導磁石によりサイクロトロンが小さくなる事により、ビームの質や取り出しに問題が出てくるのでは無いかという事である。しかし、程なく、Blossor は、その考えを改め、1973 年に超伝導サイクロトロンの超伝導磁石の実証機の検討

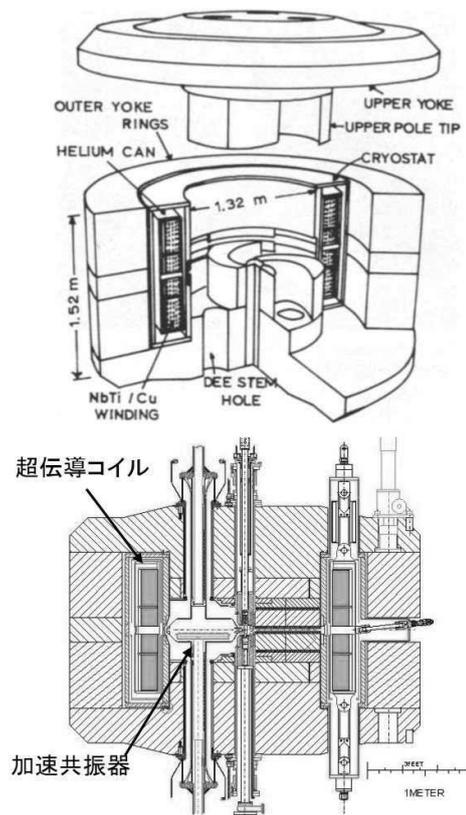


Fig. 2 超伝導サイクロトロン (K500) の構造図。鳥瞰図(上部)断面図 (下部)³⁾

を始めることを決定し、1974 年には超伝導サイクロトロンの設計を発表した。

世界初めて作られた超伝導サイクロトロン (K500) の構造を Fig.2 に示す³⁾。ポール (磁極) を囲う様に設置されたクライオスタットの内部には一対の円形のコイルがあり、コイルの生成する磁場の対称面においてビームが閉じ込められ加速される。ポールは鉛直方向の収束を得るために、方位角方向に凹凸がつけられていて、フラッター磁場を生成する。ポールが凹んでいて、広い間隙が出来たところに加速共振器が設置される。共振器は半波長共振器になっており、同軸管の部分を通すためにヨークには大きめの穴が開いている。

最初の K500 の製作や運転においては、様々な問題が生じ、苦勞したようだ。当初はアルゴンヌ国立研究所(ANL)と共同で超伝導磁石を開発する予定だったが、ANL の内部事情で、ANL がこのプロジェクトから降りたため、MSU は単独で、

ゼロからこの超伝導磁石を作らなければならなくなかった。しかしながら、この予期せぬ出来事は、後の MSU には良い方向に働いた。超伝導磁石を製作する技術が MSU に蓄積され、サイクロトロン後のビームラインや実験装置の超伝導磁石は自前で安価に設計製作出来る様になった。

K500 のコイルは、サイクロトロンの電磁石として初めて作られ、当時、MSU の超伝導磁石の製作についての経験も浅かったこともあり、数々の想定外のトラブルを経験した。それらを乗り越えていくことにより超伝導サイクロの技術を培ってきた。詳細については、2004 年、東京で行われたサイクロトロン国際会議のサマリートーク” 30years of superconducting cyclotron technology” を参照されたい¹³⁾。保護抵抗が燃えた話やコイルサポートリンクが壊れた話などが書いてある。この K500 のコイルにはショートしている箇所があり、初期のオペレーションでは深刻な問題を抱えていたようだが、その「古傷」を庇いながらも運転は続き、この名機は、2020 年 11 月に役目を終えた。

2.2. K500 のコイルの詳細³⁾

ここでは、少し踏み込んで K500 の超伝導コイルの設計と見舞われたトラブルについて述べる。

Fig.2 には磁石の構造が描かれていて、コイルの断面を表す青い部分が二つに分かれているように書かれている。これは、実際コイルが分かれて疲れていて、ビーム軌道面に近いコイル側のコイルと遠い側のコイルが作る半径方向への形状が違う事を利用して、様々なイオンと取り出しエネルギーに応じた等時性磁場を容易に生成することを可能にしている。重イオンサイクロトロン特有のコイルの作り方と言える。勿論これにより、コイルの絶縁の構造が複雑になることは否めない。

超伝導線は Fig.3 の様な構造のものが使用されている¹⁴⁾。長方形の銅の導体に直径 40 ミルの銅線 9 本に、NbTi のフィラメントが 114 本埋め込まれている銅線 3 本が巻き付けられ全体では、0.110” x 0.196”の銅線となっている。それぞれは

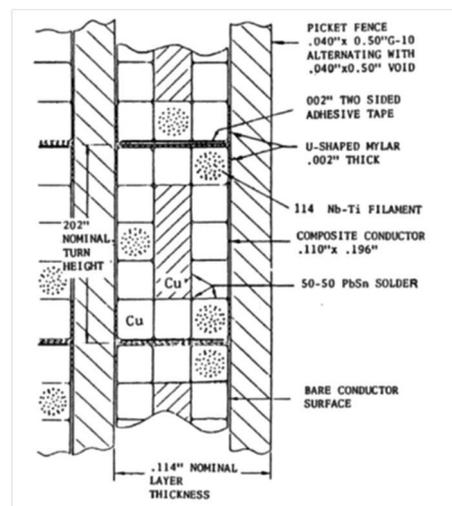


Fig. 3 MSU K500 超伝導導体¹⁴⁾

はんだで固定されるという大分複雑なものである。銅比は 21 である¹⁴⁾。

上記の導体は、裸線のままソレノイド巻きされ、浸漬冷却される。各レイヤーには、導体の表面の 50%が液体ヘリウムに露出するように短冊状のスペーサーで絶縁をとってある。導体が直接液体ヘリウムに触れるため冷却特性は良いが、切りなどの混入により、レイヤー間がショートするリスクがあるため、巻き線の時には細心の注意が払われる。

Fig.4 はコイルブロック、巻枠、外側バンドに掛かる内部ストレスを冷却、励磁の場合でどのように変化していくかを計算で示したものである。点線が SUS の外側バンド、実線がアルミのバンドを想定したものである。”warm”と記されたものが巻き線が終わった時のもので、巻き線や banding のテンションのために、巻枠やコイルブロックは圧縮応力が維持されている。コイルを冷却すると、構成する部位の熱収縮差により、各部位の応力が変化し、励磁によりコイルにより生じる電磁力により再び各部位の応力が変化する。これらの計算に基づいて、K500 では、最終的なコイルに生じる応力が小さくできるという理由からアルミのバンディングが採用された。アルミの熱収縮率は SUS や銅よりも 0.1%小さいことに起因する。ここで気を付けたいのは、field-on の状態でコイル内のストレスが正を示すが、巻枠は圧

縮されている。このことはコイルはボビンを押していることを示唆する。コイルに対する位置の変化は起きない。

Blossor は文献 15 で K500 では、以下の 3 つのトラブルがあったと記している。(1) コイル容器内の液体ヘリウム低で最大励磁からのクエンチ (2) 断熱真空の破れ (3) 断熱支持棒の損傷。超伝導コイルにとって起こり得るトラブルを一通り経験したことになる。また、コイル内には小さな切子がある様で、ショートがあり、定常状態では問題にならないが、励磁や減磁の際には“ミニクエンチ”という興味深い現象が起きていたようである。

ここでひとつ言っておきたいことは、ビーム軌道面を挟む形で設置されている一対のコイルは互いに引き合うが、コイル全体は不安定な位置に置かれているという事である。つまり、コイル全体の位置の微小なずれに対して復元力が働くわけではなく、そのずれを助長するような向きに力が働くという事である。そのため、鉛直方向の支持棒は、その負のばね定数より十分大きいばね定数を持っている必要がある。この設計を誤るとコイルを損傷することになるため、気を付ける必要がある。

2.3. K500 後の超伝導サイクロトロン

K500 で培った技術のおかげで次につくった K1200¹⁶⁾のサイクロトロンは、非常にスムーズに作れたとのことである。K1200 の単独運転でのファーストビームは、1988 年である。元々、K500 と K1200 は連結して主に重いイオンを高エネルギーまで加速する予定だった。すなわち、K500 から来たビームを K1200 の中心近傍まで導きそこでチャージストリッピングする事により入射し K1200 で加速するというものである。この計画は 1990 年に認められ、2001 年にファーストビームが得られた¹⁷⁾。

K500 での成功以降、この設計を基に以下記す様な超伝導サイクロトロンが作られた。

- K500 MSU (USA)³⁾
- K520 Chalk River (Canada)¹⁸⁺⁾
- K1200 MSU (USA)¹⁶⁾
- K800 Milano (Italy)¹⁹⁾
- K500 Texas AM (USA)²⁰⁾
- K600 AGOR (Netherland)²¹⁾
- K500 Calcutta (India)²²⁾

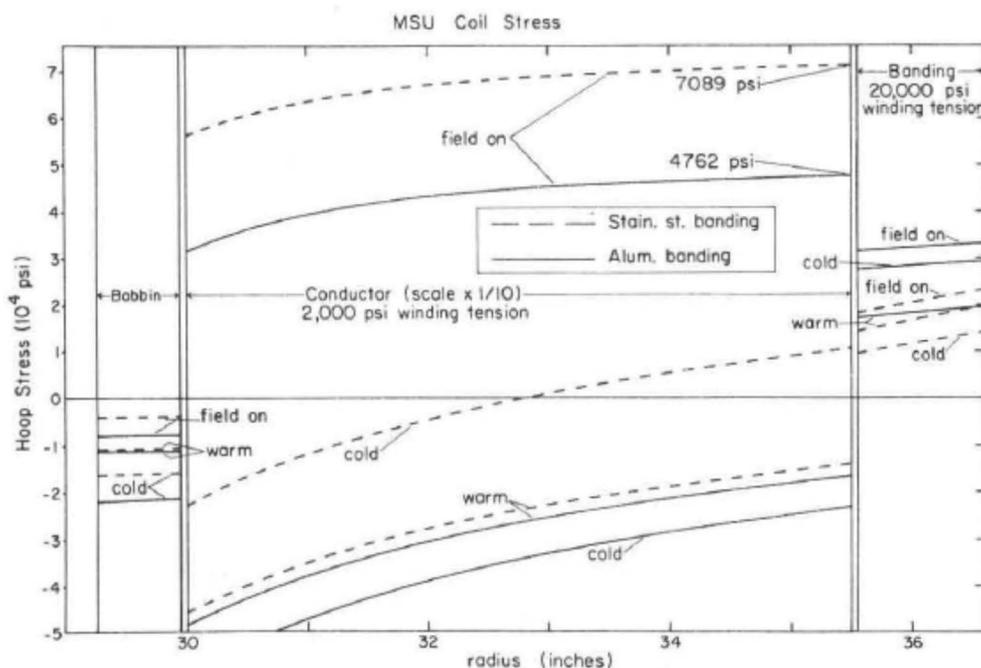


Fig. 4 MSU K500 のコイル応力解析³⁾

ここに挙げたものは、主に原子核物理の研究用のものであるが、RI 製造やがん治療用の超伝導サイクロトロンも H.Blossor の指導の下、製作された。Fig.5 の写真はデトロイト病院に納められた中性子がん治療用の回転可能な超伝導サイクロトロンである²³⁾。超伝導サイクロトロンがガントリー上に乗っかっていてともに回転するというものである。二人がサイクロの上にいるが、左側が H. Blossor である。

この章の最後にサイクロトロンを超伝導化する事によってどれほどサイクロトロンが軽くなったかを Fig.6 を用いて説明する。サイクロトロンの K 値は、サイクロトロンの性能を表す指標のひとつであり、

$$K = \left(\frac{M}{Q}\right)^2 E$$

と表される。ここで、M は加速粒子の質量数、Q は価数、E が取り出したビームの核子当りのエネルギー(MeV)である。1986 年に世の中に存在していた各サイクロトロンの重さをプロットしてみると超伝導サイクロトロンの方が、常伝導サイクロトロンより、ほぼ 15 倍軽くなっているという結果が得られた²⁴⁾。

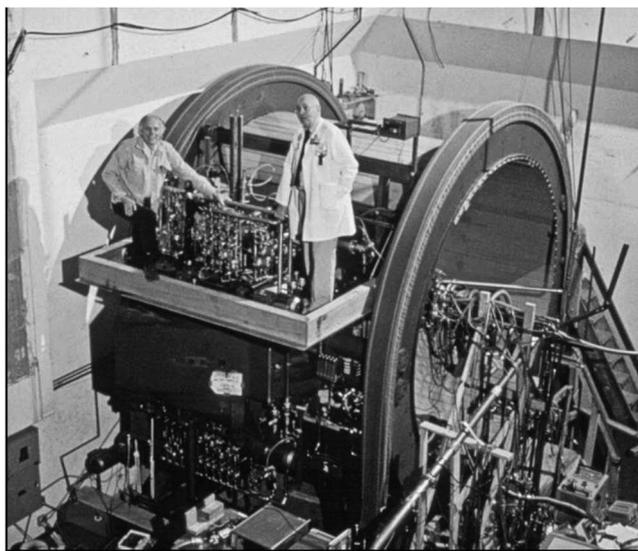


Fig. 5 中性子治療用の超伝導サイクロトロン²³⁾

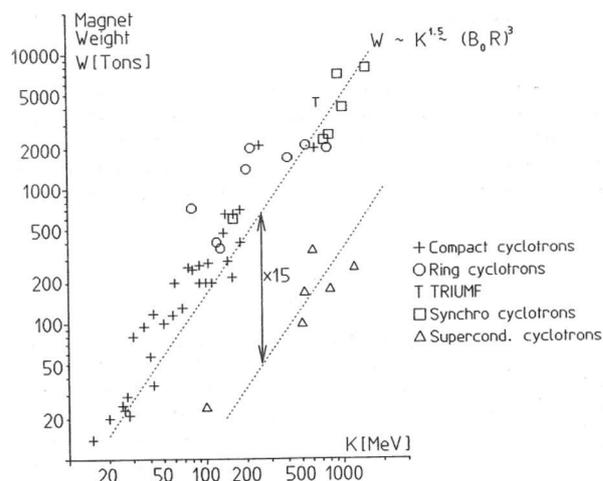


Fig. 6 サイクロトロンの重さと K 値の関係。超伝導サイクロトロンと常伝導サイクロトロンの比較²⁴⁾

3. 理研のリングサイクロトロン?

3.1. リングサイクロトロンの台頭

サイクロトロンで加速する粒子のエネルギーが高くなると、相対論的な効果、粒子が重くなる効果が無視できなくなる。等時性を保つためには、速さが増す外周ほど、粒子が重くなる効果を補って磁場を増やしてやる必要がある。このような等時性磁場は、平均半径に対して増加する磁場分布であるため、ビームの鉛直方向について発散力となる。その発散力を打ち消して収束力を与える

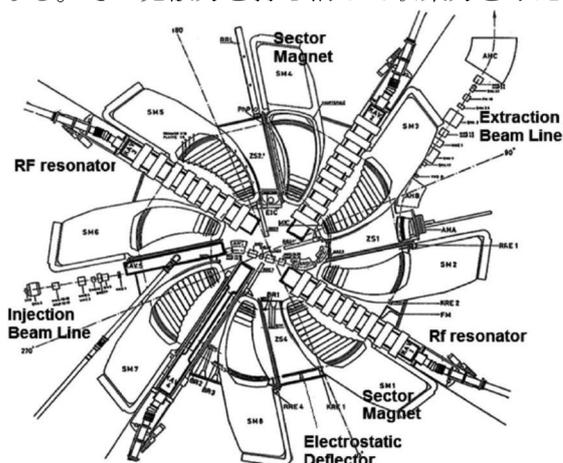


Fig. 7 PSI リングサイクロトロン平面図²⁵⁾

ために、方位角方向に磁場の強弱をつける(フラッター磁場)。前章にも述べたが Fig.2 の MSU の超伝導サイクロトロンの中にあるポールに凹凸がついているのはその収束力をつけるためである。また、ポールの形状がスパイラルになっているのも鉛直方向の収束を与えるものである。この収束力は磁場の強弱に比例して増えるため、扇型のセクター電磁石を並べれば、磁場の弱いところがゼロとなり、より強い鉛直収束力が得られる。この考えのもと作られたのが分離型セクターサイクロトロンである。この場合、あらかじめ前段加速器で粒子のエネルギーを上げてから入射する場合がほとんどで、ゼロエネルギーからの加速でない。よって、真ん中が空いていてリングの様に見えるという意味も含めてリングサイクロトロンと呼ばれることが多い。リングサイクロトロンの大きな利点はセクター電磁石とセクター電磁石の間、磁場の無い領域(バレイ領域)に大型の共振器を入れる事が出来る所にある。Fig.7 にスイスの PSI のリングサイクロトロンの例を示すが、大型の RF 共振器がその様に配置されていることがわかる²⁵⁾。この一つの共振器で 1MV の加速をすることが可能である。共振器は 4 基あり、1 周当り 4MV である。1 周当りの加速を増やし、サイクロトロン内での周回数を減らすことが、大

強度のビームを出すことに本質的である。実際、1974 年代に製作され当初は陽子 $100\mu\text{A}$ 程度だった PSI のサイクロトロンは、30 年余りの年月をかけ共振器の電圧を増やし、ビーム強度を増やし、2010 年には、世界で初めて 1.3 MW(2.2mA) のビームを出すことに成功した²⁵⁾。2018 年に米国 SNS のリニアック²⁶⁾が 1.4MW のビームパワーを達成し、それを超えるまでは、世界一のビームパワーを誇っていた。

1980 年代から、リングサイクロトロンで主に重イオンをより高いエネルギーまで大強度で加速する事を目指して、セクター電磁石を超伝導する事を検討されてきた。エネルギーは最大で 400MeV/u 程だが、ウランの様な M/Q が大きい重イオンを加速するために、必要となる磁場が超伝導磁石でないと到達できない領域に達してしまう。このような超伝導リングサイクロトロンの検討は、欧米(独²⁷⁾、仏²⁸⁾、米²⁹⁾)でなされたが、結局建設不可能という結論に至り、現実のものとなっていなかった。この幻のサイクロトロンが世界で初めて現実のものとなったのは、理研の RIBF においてである⁴⁾。以下、この RIBF と超伝導リングサイクロトロン(SRC)⁵⁾の概要を述べる。

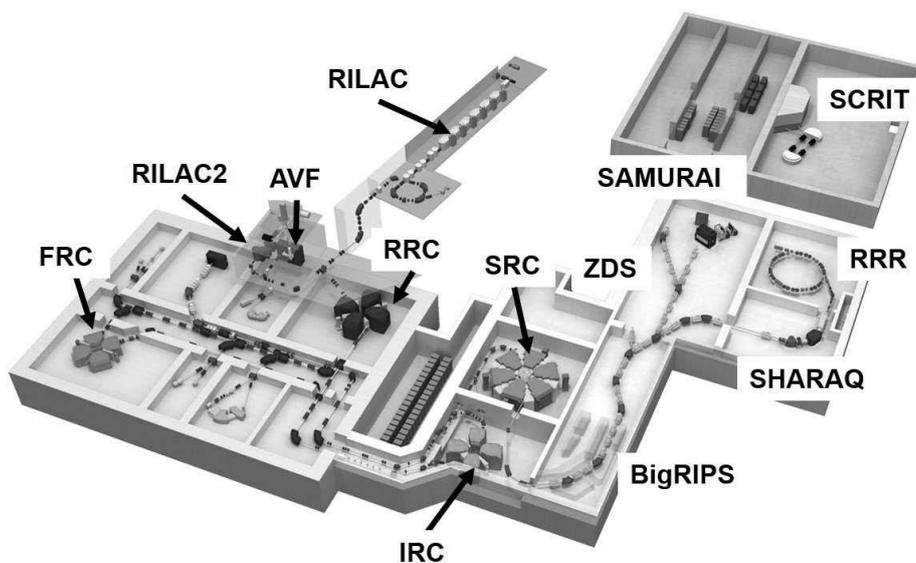


Fig. 8 RI ビームファクトリー(RIBF)鳥瞰図

3.2. 理研 RI ビームファクトリー

RIBF は、水素からウランまでの全元素に渡る RI ビームを世界のトップレベルの強度で生成することが可能である。不安定な原子核（不安定核＝RI）が前方集中したビームとして生成されるため、この RI ビームを用いて、多種多様な性質を示す原子核の新たなモデルの構築、ウランの様に重い元素の起源の解明といった根源的な研究が可能となった。また、RI がある寿命を持ち、 α 、 β 、 γ 線を放出するという放射性の性質を利用した、工業、医学、化学、生物への応用も幅広く展開されている。このような RI ビームは自然界に安定に存在する原子核の大強度イオンビームを入射核破砕反応や核分裂させることによって生成されるため、この種の施設には大強度の重イオン加速器が必要不可欠である。Fig.8 に RIBF の鳥瞰図を示す。RIBF は、1986 年より稼働している K540-MeV リングサイクロトロン(RRC)³⁰⁾の後段加速器として、3 つのリングサイクロトロン、fRC（固定周波数リングサイクロトロン）³¹⁾、IRC（中間段リングサイクロトロン）³²⁾、SRC（超伝導リングサイクロトロン）³³⁾を開発し建設した。この新しい多段加速器系は質量数 40 以下の軽いイオンなら 400MeV/u まで、そして、ウランのような重い元素のイオンでも 345MeV/u まで加速できるように設計されており、目標の電流値は $1\text{p}\mu\text{A}$ (6×10^{12} ions/s)である。こうして加速された重イオンビームは BigRIPS（超伝導 RI ビーム分離生成装置）³⁴⁾において RI ビームに変換される。

3.3. 超伝導リングサイクロトロン(SRC)の概要

SRC はこの RIBF の最終段加速器として、最大 640MV 加速する必要がある。Fig.9 に SRC の平面図、Fig.10 にその鳥瞰図を示す。SRC の K 値は 2600MeV と従来の最高値の 2 倍以上となる「史上最強のサイクロトロン」とでも言える。SRC は、主に 6 基の超伝導セクター電磁石、4 基の高周波加速共振器、1 基のフラットトップ共振器、入射取出し機器から構成されている。超伝導磁石最大蓄積エネルギーは 235MJ、全重量は 8300 トン、直径 19m、高さ 8 m である。

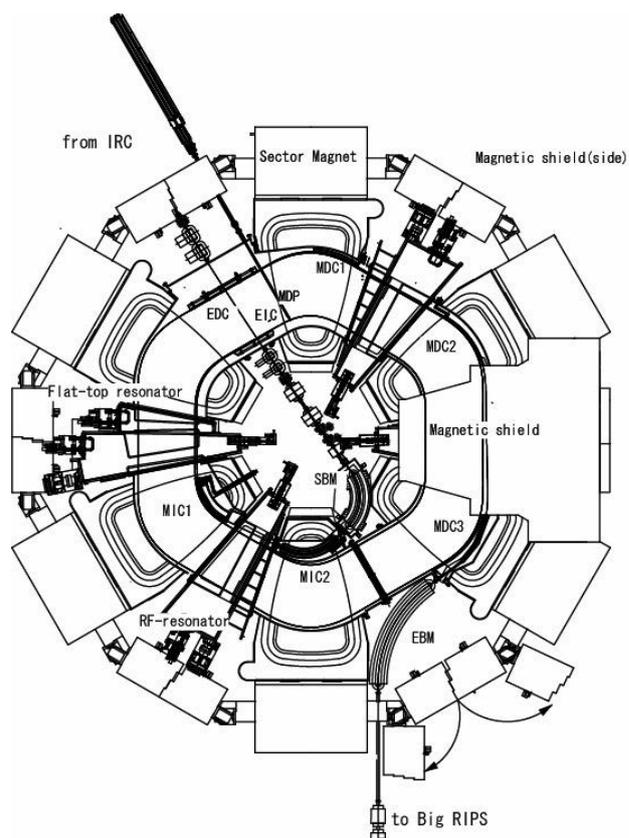


Fig.9 超伝導リングサイクロトロン(SRC)平面図⁵⁾

SRC 中の超伝導磁石は、6 基のセクター電磁石³³⁾と入射用偏向電磁石³⁵⁾の 2 つである。まず Fig.11 にセクター電磁石の断面図と平面図を示す。この磁石の全長は 7.2m、高さは 6m、重さは 800 トンである。セクター角は 25 度で、 $^{238}\text{U}^{86+}$ のイオンを 345MeV/u まで加速する為には、軌道

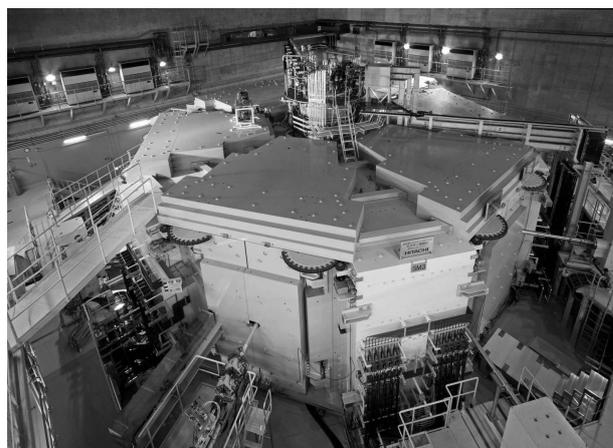


Fig.10 SRC 鳥瞰写真。黄緑色がセクター電磁石、薄紫色がシールド。

平面上での最大磁場、3.8T が要求される。セクター電磁石の主に 1 対の超伝導主コイル、4 対の超伝導トリムコイル、クライオスタット、断熱支持棒、22 対の常伝導トリムコイル、常温のポールそしてヨークで構成される。

この SRC は、前章で述べた H. Blosser が作った超伝導サイクロトロンより規模が 1 桁以上大きい。また、超伝導コイルが円形ではなく、複数の扇型のコイルを作る必要がある。さらに等時性磁場を作るための超伝導トリムコイルは、あばらの様な形状をしており、入射の磁石 SBM はバナナ型の曲がったコイルが必要となる。これら非円形超伝導コイルの製作は大変チャレンジングであった。また、この SRC は通常のリングサイクロトロンとは違って、約 1m の鉄のスラブによって、セクター電磁石の間のバレー領域が覆われている。こうした構造を採用することにより、磁気シールドと放射線シールドの機能が強化され、セ

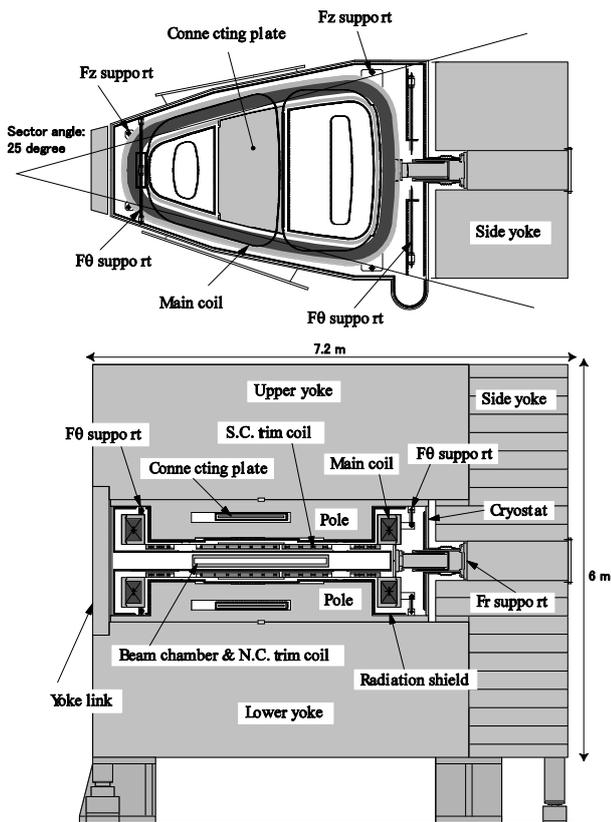


Fig. 11 セクター電磁石の平面図と立面図⁵⁾

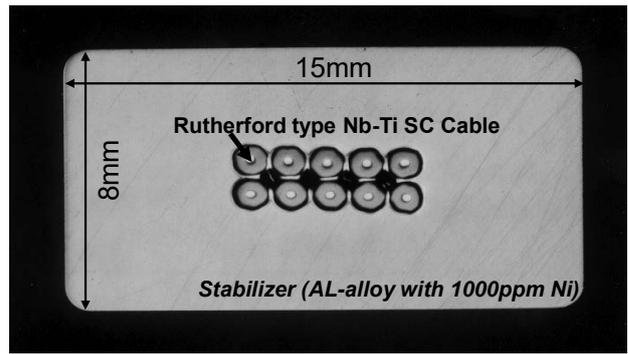


Fig. 12 SRC 超伝導線材の断面⁵⁾

クター電磁石からの漏れ磁場は劇的に減少し、定格磁場を生成するための起磁力を減らすことができた。

3.4. SRC 超伝導コイルの詳細

超伝導主コイルとトリムコイルには、Fig.12 に示すようなアルミ安定化導体³⁶⁾が用いられた。8 × 15 mm²のアルミ合金の中心にラザフォード型の NbTi の超伝導ケーブルが埋め込まれている。アルミ合金は極低温状態で低い抵抗を保ちつつ機械強度を強くするために、純アルミに 1000ppm のニッケルが含まれている。これにより降伏応力が常温で 55MPa(純アルミは 40MPa)、RRR は 800 以上が得られている。SBM はモノリスの NbTi フィラメントが Cu に埋め込まれたモノリスの導体が使われた。

主コイルの周長 10 m であり、その形状は、Fig. 11 に示す様に円形ではなく、おむすび型をしている。コイルブロックは 4 MAT (メガアンペアターン) の起磁力を生じさせるために、Fig. 13 の様に 396 ターンのソレノイド巻きから成っている。主コイルは電気絶縁を保つために FRP のスペーサーによってそれぞれの導体間に間隙が作られており、その間隙のサイズは、水平方向が 0.8 mm、鉛直方向が 1.5 mm である。コイルは、容器内の液体ヘリウムに浸されて冷却されるが、短冊状の鉛直方向スペーサーを、間隔を空けて設置することにより導体の鉛直方向の表面が約 50% 液体ヘリウムに直接接触していることが保証されている。この冷却チャンネルによりマドックの安定化電流³⁷⁾は、別途小さなモデルで測定された熱

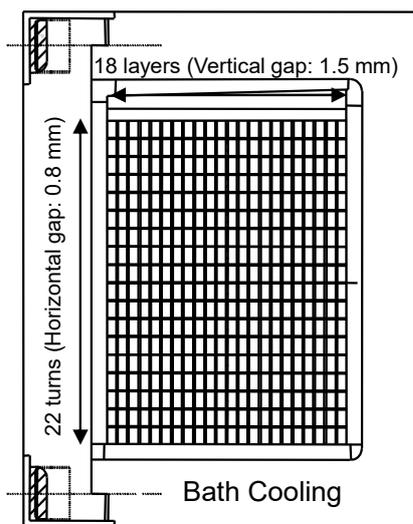


Fig. 13 SRC 主コイルのコイルブロックの断面図⁵⁾

流束のデータから 6300 A 以上と見積もられ、これは最大運転電流の 5000 A より十分大きい値である。この安定化電流は小さなモデルコイルを用いた実験によっても確認された。主コイルのコイル容器は全て SUS である。前章で MSU K500 のコイルのところで述べた様にこのコイルが常にコンプレッシブにはなっていない。一回冷却するとアルミの熱収縮が SUS のそれよりも 0.1% 小さいので十分降伏すると考えられる。そのあと昇温して再冷却すると、コイルが緩んでしまうのではという事が危惧された。また、ターンやレイヤーの移り変わりの処理をする段階で、巻き線のテンションは抜ける。これらの事より、実際励磁する際には導体は動きやすく、導体の安定性のおかげで、クエンチには至っていないと考えられる。2 回目に励磁する時は緊張したが、これまで一度もクエンチを起こしたことはない。このように、普通巻き枠と線材の熱収縮率はなるべく同等にするのが基本であるが、この主コイルは、その基本を破っている。「あのコイルはなんで上手くいっているんだっけ？」と、超伝導磁石の専門家から問い合わせが来ることがある。実際の巻き線では、導体の降伏応力が高いものであるとは言え、やわらかく巻きにくいという話を現場からよく聞いたが、三菱電機や日立製作所のコイルの巻き線のプロたちはしっかり仕事をしてくれた。巻き線で

一番手のかかるところはターンとレイヤーの変わるところで、モデルのコイルを作った時は、その部分でのレイヤーショートが多発した。原因はそのトランジションでの磁場の擾乱が発生するのを嫌って大トランジションの長さを大分短くしたためと思われる。これらの経験をもとに、実機ではビームへの影響の少ないところで 2m ほどかけてトランジションを行った。

電磁力について述べる。SRC においては Fig.9 にあるように 6 基のセクター電磁石が 6 回対称に設置されている。6 対の超伝導コイルはがお互いに反発しあって広がろうとする。このコイルの移動力は、外周部に置かれた各セクター 1 本ずつの断熱支持棒で支持される。このコイルに掛かる移動力は、差分力であるため計算精度が出るか不安があった。計算値が最大 40 トン程度であることを予想したが、支持棒の設計としては 90 トンと 2 倍以上の安全率を想定した。Fig.14 は、その移動力の計算と測定結果である。結果的には計算値は測定値を良く予測していたことになる。

極低温部ではないが、電磁力の扱いが厄介だったものがポールであった。通常、常伝導の双極磁石で、ポールは、励磁するとヨーク側に引っ張られ、安全な向きに力が働くと思われている。しかしながら、今回の場合は、最高励磁の際にポールはビーム面の方向、ヨークから離れる方向に力が働くことが判明した。ポールに働く力は、ヨーク

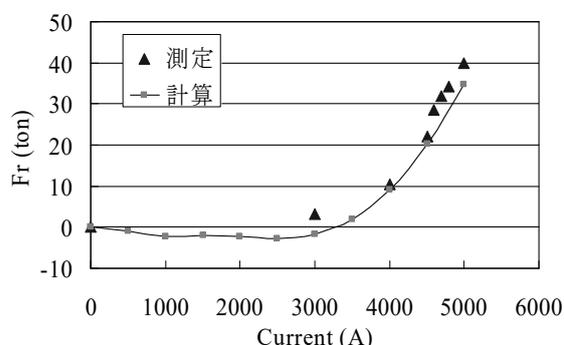


Fig. 14 SRC 主コイルの半径方向移動力⁵⁾

側の面の磁束密度とビーム面側の磁束密度の大小で決まる。この SRC の超伝導コイルとポール面の位置関係からビーム面側の磁束密度の方が大きい。そのため、ポールには 760 トン近い力でヨークから離れようとする。これに気づいたのは、設計の最終段階で、急遽このポールを長いボルトでヨークの外側から引っ張る構造とした。

主コイルは浸漬冷却のコイルであるため、液面さえしっかりあれば励磁できるという安心感はある。先ほど述べた MSU の K500 が液面低で運転してしまいクエンチしたという事を書いたが、SRC の主コイルも似たような事をしたかもしれないことがあった。インターロックをしっかりとっていない初期の運転で、泡抜きのバルブを開けて励磁しようとしたことがあった。この状態では、超伝導コイルの一部が気相にさらされているためクエンチするリスクは高かった。今思えば冷や汗のものであるが、その時に横にいて指摘してくればオペレータの方には今でも感謝している。

超伝導トリムコイルの構造を Fig.15 に示す。セクター電磁石のビーム加速領域をカバーするものである。これらのコイルは加速条件によってさまざまな等時性磁場を生成できるように4つのコイルからなり、最大電流値は 3000 A である。このように薄くて広いコイルを作るためにダブルパンケーキ巻きが採用され、コイル全体は主コイ

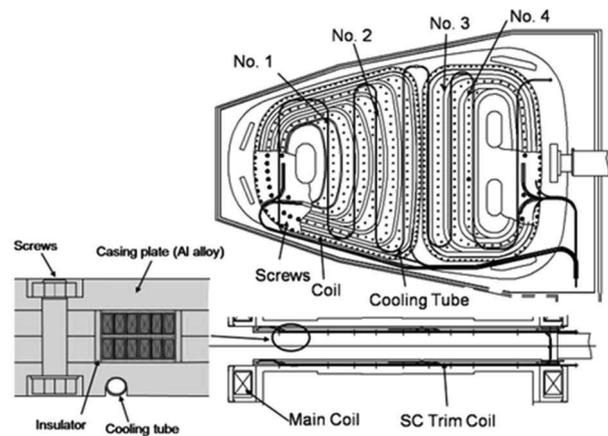


Fig. 15 SRC 超伝導トリムコイルの平面図と断面図⁵⁾

ル容器に取り付けられている。コイルブロックは2枚のアルミ合金の板によってサンドウィッチされ、エポキシ接着剤とボルトによって固定されている。コイルはアルミ合金の板に溶接されたアルミチューブ中を通る気液2相流ヘリウムによって間接的に冷却され、温度マージンは約 2.1 K に設定された。接着で冷却を保っている。接着材のエポキシが放射線でやられるとコイルが冷えなくなる。ボルトで抑えているから大丈夫であるという意見もあるが悲観的に考えると、個々の接着がれっかして冷えなくなるというが SRC の寿命を決めると考えられている。

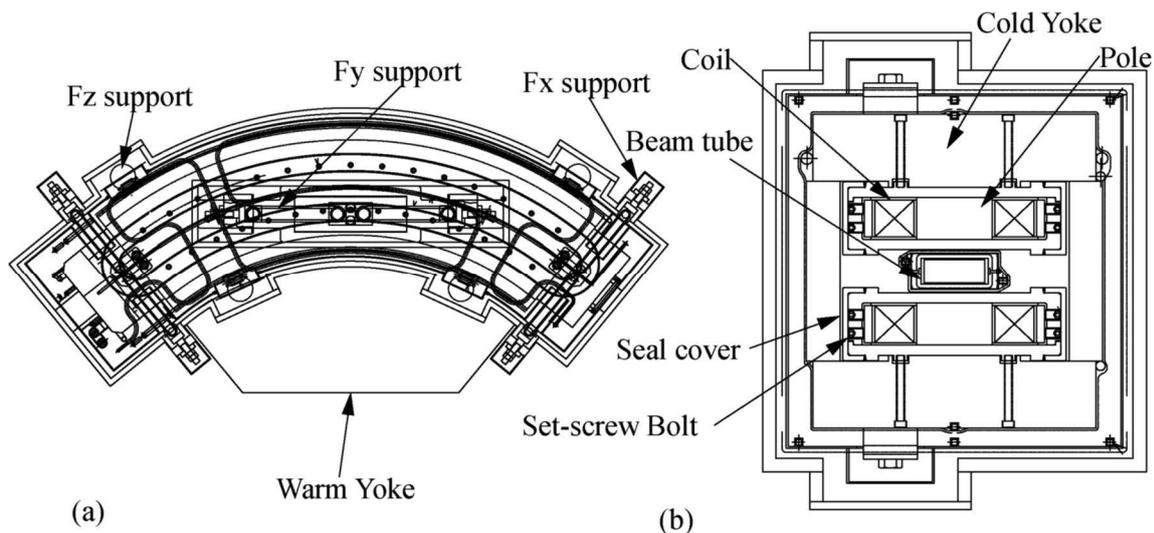


Fig. 16 SRC 入射用超伝導変更電磁石の平面図と断面図³⁵⁾

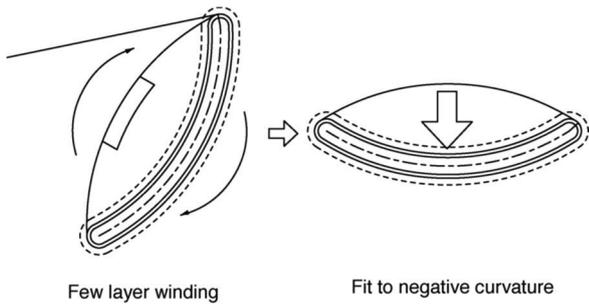


Fig. 17 SRC SBM 超伝導コイルの巻き線方法³⁵⁾

SRC の中にはセクター電磁石の他にもう一つ入射用偏向電磁石(SBM)という超伝導磁石がある。(Fig.16) これは前段の加速器群によって加速された重イオンビームを SRC の中心領域においてセクター電磁石の内部に引き込むための磁石である。セクター電磁石に比べれば大分小さいものだが、SBM はスペースや要求磁場 (軌道上最大磁場 : 3.8 T、コイル内最大磁場 : 4.2 T) の関係から、曲がったコイル (曲率半径 1.2 m、曲げ角 76 度) を使用せざるを得ず、セクター電磁石とは違った難しさがあった。巻き線は安定な超伝導コイルを作る基本は、しっかり巻く事であるので、この様に曲がっていて、負曲率の場所がある形のコイルをどのように巻くかは設計上の最大の課題だった。Fig.17 に示すように最終的には負曲率の無い形で何層か巻いてから、本来のコイルの形に層ごとに重ねて行く方法を採用し、Fig.18 の様に



Fig. 18 SRC SBM の超伝導コイルの仕上がり³⁵⁾

きれいなコイルを製作する事が出来た。巻き線後、コイルはエポキシ含浸される為、コイルの冷却は、導体に液体ヘリウムが触れない間接冷却と言うことになるが、冷却性能を向上させるため、鉛直方向のクーリングチャンネルが約 20 層ごとに入れられている。初回の励磁試験の際に、定格磁場に行くまでに一度クエンチしたが、実際の加速器の運転では一度もクエンチしていない。

曲がったコイルを使用しているため、コイルに掛かる移動力が、約 30 トンとかなり大きかった。しかし、Fig16 の様にヨークの一部をコールドヨークとし、対称に配置することにより、室温部に出ていくフラックスが減り移動力は大幅に減少した。

3.5. SRC の長期運転

2006 年末に SRC からファーストビームが得られ、2007 年から本格的な運用が開始された³⁸⁾。これまで加速された、イオン種と強度を Fig.19 に示す。軽いイオンについては既に目標の $1\mu\text{A}$ を達してカルシウムについても順調に目標に近づきつつある。ウランについては、オペレーション初期ではビーム強度が少なく、ウランイオンのビーム強度を 100pA まで増やす事が、当面の目標であった。運転開始直後からウランのビーム強度を増やすために、加速効率の向上、イオン源の強

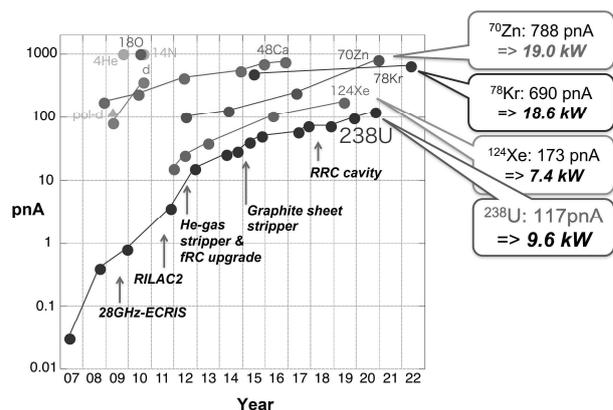


Fig. 19 2007 年から 2022 年までの加速実績。ビームエネルギーを明らかに書いていないものは、 345MeV/u を示す。⁴³⁾

化³⁹⁾、チャージストリッパーの開発⁴⁰⁾⁴¹⁾⁴²⁾、RF電圧の増強等が行なわれ、2020年の秋の運転では、117pnAにまで達した。

SRCが実現不能と言われつつも完成し、16年も順調に運転できた要因は、いくつかあるが、基本的には、超伝導に頼りすぎなかった事にあるのでは無いかと思っている。我々は設計の最終段階において、どうしても超伝導でなければいけないものを除いては、当初超伝導コイルを用いて設計されていたものを鉄や常伝導コイルを用いて設計しなおした。例えば、上述のSRCのバレー領域の磁気シールドは、当初はSRC全体を囲うアクティブシールドコイルが検討されていた。アクティブシールドコイルは、外側の磁場は打ち消すが内側の漏れ磁場をより増やすことになり、必要な起磁力を増やす方向となる。また、EBMも当初は2つの磁石を繋いで取り出しビームの軸出しが出来るようになっており、超伝導磁石を採用していたが、1つにまとめて、補助コイルにより、軸出し機能がつけられるようにして、2.1T程の常伝導磁石とした。EBM近傍は取り出し条件が理想的でない場合が多く、ビームロスが多いところであり、ビームロスによるクエンチが誘発されることを嫌った為である。

Fig.6のサイクロトロン重さのプロットを作り、サイクロトロンの重さの公式を作ったのは、PSIのW. Johoである。彼から「君たちの超伝導サイクロトロンの重さは、僕の公式から大きく外れていて、重過ぎる。本当に超伝導サイクロなのか？」と言われたことがある。SRCが鉄を沢山使って、「らしくない」超伝導サイクロトロンとなったのは、過度に超伝導に頼りすぎないで安定に運用できるサイクロトロンを目指したからである。

4. 完全なる超伝導サイクロトロン

サイクロトロンを構成する磁石も共振器も超伝導化する事を最初にめざしたのは、Trinksらのグループである。彼らはSOC(分離軌道型のサイクロトロン)を提唱している⁸⁾。ハイパワー低ビームロスのサイクロトロンの運転を実現させるためには、1ターン当たりの加速電圧を大幅に増や

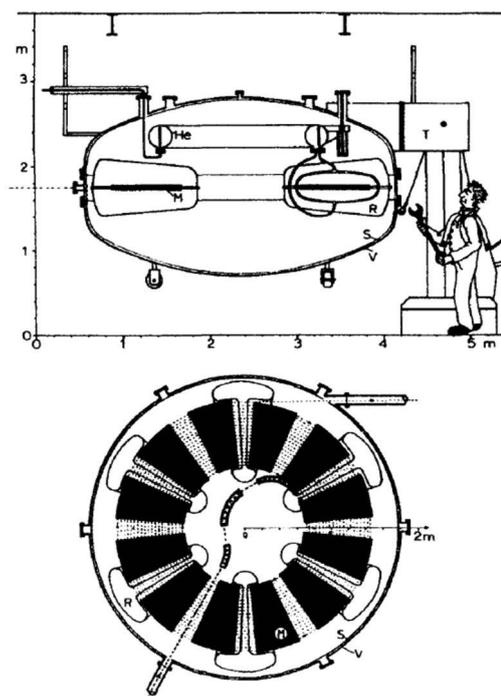


Fig. 20 Tritron 構造図。8)

し、ターンセパレーションを通常数ミリの所を1cm程度まで増やすことが必要である。こうする事が必要な理由は主に3つある。まず、longitudinal方向の空間電荷効果によるカレントリミットは加速電圧の3乗で増えていく。次にビームの取り出しには、ターンセパレーションを大きくすることでビームロスを減らすためには必要である。3つ目は、大きなターンセパレーションにより、各ターンを独立にマグネティックチャンネルで輸

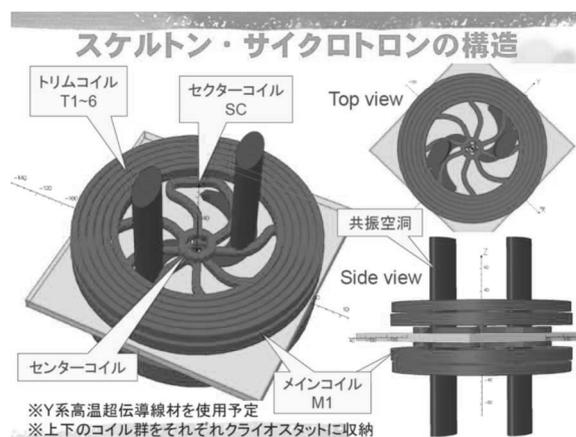


Fig. 21 スケルトンサイクロトロンの構造図 9)

送する事が出来る。マグネティックチャンネルを用いる事により、Alternating Field gradient の強収束が可能となる。

この SOC は、Fig.20 に示す様に、大型の超伝導キャビティと超伝導マグネティックチャンネルで構成される。1993 年に完成しビームコミッションが開始されたが、取り出しまで 20 ターンするところ、6 ターン位しか回らない状態で計画は終わりを迎えた。ビーム調整が難しかった理由は、マグネティックチャンネルのボア径が 1 cm 程度だったこともあるが、各チャンネルへビームを通すために共通の加速空洞を使っているという、この加速器の基本的な構造に起因するところもある様に思われる。最近の機械学習の技術等を使えばもう少し調整しやすくなるのではと思うが、この TRITRON も世の中に存在しないので後の祭りである。また、加速空洞の機械的な強度が不足していて、「人が部屋に入ってくるとビームがぶれる。」という噂を聞いたことがある。

5. まとめ

超伝導サイクロトロンを振り返る為に、MSU の超伝導サイクロ、理研の SRC、そして、共振器も超伝導化することに挑んだ TRITRON について述べてきた。現在、まだ実現はされていないが、新しいコンセプトに基づく超伝導サイクロトロンが提案されてきている。これらは、これまでに述べてきた 3 つのタイプの超伝導サイクロトロンをの発展形といえる。

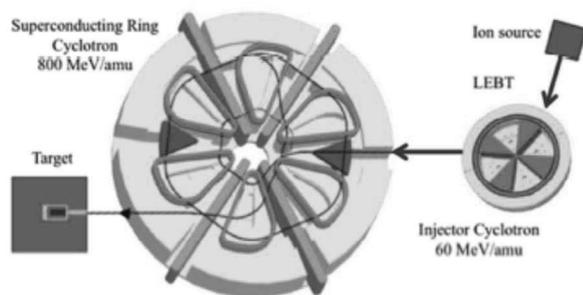


Fig. 22 Daedalus 計画の超伝導リングサイクロトロン⁴⁴⁾

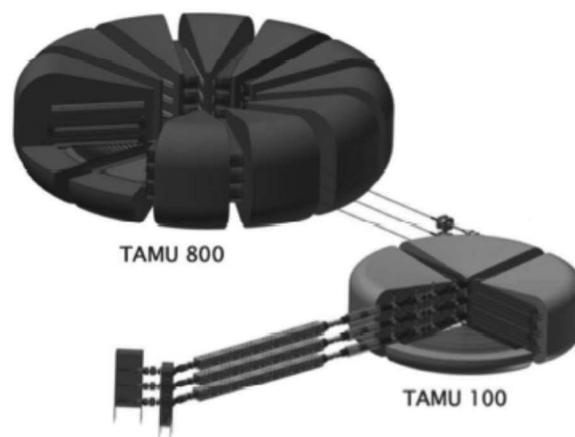


Fig. 23 Stacked Cyclotron⁴⁵⁾

まず、MSU の超伝導サイクロトロンタイプの発展形としては、総じて更なる軽量化というのが目的のようで、ヨークを使わないで超伝導コイルのみで磁場を作るサイクロトロンが提案されている。大阪大学のグループが提案している高温超伝導体を使ったスケルトンサイクロトロン(Fig.21)と呼ばれるもので、鉄は一切使わない⁹⁾。更に高温超伝導体を使うため、ヘリウムフリーとなっている。ヘリウム不足の危機と言われている昨今においては、実現が待望される。理研の SRC タイプのものでは、Daedalus とするニュートリノを用いて CP 対称性の破れを観測するためのプロジェクト⁴⁴⁾で、5mA 核子当たり 600MeV の H²⁺を加速するという非常にチャレンジングなものである (Fig.22)。3-4 個超伝導リングサイクロトロンが必要との事である。最後の Tritron タイプの発展形としては、TexasA&M の方々提案した Stacked cyclotron である (Fig.23)。基本的には Tritron に似ているが、サイクロをスタックして強度を増やそうというアイデアが加えられているものである⁴⁵⁾。

昭和のテレビ CM で「おおきいことはいいことだ！！」と歌いながら気球に乗った山本直純が指揮をするチョコレートの宣伝があったが、私は、理研の SRC の前に立った時は、必ずこの曲を思い浮かべることにしている。平成、令和の世では、

同じ性能だったらなるべくコンパクトかつスリムな物が美德とされる時代なので、このCMは流行らないのかもしれない。サイクロトロンは、加速器の歴史の中でも古い部類に入るものであるが、コンパクトな加速器であることが利点である。そのため、病院等の「日常生活」にも導入されるようになってきている。最近ではご自宅のリビングでサイクロトロンを作ったというようなニュースがあるくらいである⁴⁶⁾。サイクロトロンがコンパクトであり続けるために、超伝導技術が一役買っているのは間違いではない。今後も超伝導技術の発展に伴って、様々なタイプの超伝導サイクロトロンが広く製作されていくと期待される。

6. 参考文献

- [1] E. O. Lawrence, U. S. Patent 1,948,384. 1934-01-20.
- [2] ウィキペディア “サイクロトロン”
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%B3>
- [3] H. G. Blossor, Proc. of Cyclotrons1978, Bloomington, Indiana, USA (1978) 2040.
- [4] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 261, (2007) 1009.
- [5] H. Okuno, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. 18 (2008) 226.
- [6] A. Yamamoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 (1999) 852.
- [7] T. Satow et al., Nuclear Fusion 41 (2001) 731.
- [8] U. Trinks, Nucl. Instrum. Methods 220 (1984) 186.
- [9] T. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23(2013)4100205.
- [10] P. Mandrillon et al., Thorium Energy Conference 2013, CERN,
<https://indico.cern.ch/event/222140/contributions>.
- [11] C. B. Bigham, et al., Physics in Canada, 29 (1973) 29.
- [12] H. G. Blossor, Proc. of Cyclotrons1972, Vancouver, Canada, (1972) 16.
- [13] H. G. Blossor, Proc. of Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004)22B1.
- [14] 竹腰秀邦, 低温工学, 20 (1985) 19.
- [15] H. G. Blossor, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 24/25, (1987) 752.
- [16] F. G. Resmini, et al., IEEE Trans. on Nuclear Science, 28 (1981)2749.
- [17] F. Marti, Proc. of Cyclotrons2001, East Lansing, Michigan, USA (2001) 64.
- [18] J. H. Ormrod, et al., Proc. of Cyclotrons1978, Bloomington, Indiana, USA (1978) 2034.
- [19] E. Acerbi, et al., Proc. of Cyclotrons 1981, Caen, France (1981) 169.
- [20] D. P. May, et al., Proc. of Cyclotrons1986, Tokyo, Japan (1986) 195.
- [21] S. Gales, et al., Proc. of Cyclotrons1986, Tokyo, Japan (1986) 184.
- [22] C. Mallik, et al., Proc. of Cyclotrons2010, Lanzhou, China (2010) 292.
- [23] H. G. Blosser, Proc. of Cyclotrons 1984, East Lansing, Michigan, USA (1984) 431.
- [24] W. Joho, Proc. Of CERN accelerator school, CERN 87-10 (1987) 260.
- [25] M. Seidel, et al., Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan (2010) 1309.
- [26] M.A. Plum, et al, Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia (2019) 2124.
- [27] W. Schott, Proc. of Cyclotrons1981, Caen, France, (1981) 177.
- [28] C. Bieth, et al., Proc. 2nd European Particle Accelerator Conference, Nice, France, (1990) 431.
- [29] F. Marti, Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, London, England, (1994) 2304.
- [30] H. Kamitsubo, Proc. of Cyclotrons1984, East Lansing, Michigan, USA (1984) 257.
- [31] T. Mitsumoto et al., Proc. of Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) 384.
- [32] J. Ohnishi et al., Proc. of Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) 197
- [33] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007)1063.
- [34] T. Kubo, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, 17 (2007)1069.
- [35] H. Okuno, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 275.
- [36] A. Yamamoto, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 (1999) 852.
- [37] B. J. Maddock, Cryogenics 9 (1969) 261.
- [38] N. Fukunishi, et al., Proc. PAC09, Vancouver, BC, Canada, (2009) 60.
- [39] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A320.

- [40] H. Okuno et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 14 (2011) 033503.
- [41] H. Imao et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 123501.
- [42] H. Hasebe, et al., AIP Conference Proceedings 1962, (2018) 030004
- [43] O. Kamigaito et al., 15th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT2022), Darmstadt, Germany, June-July 2022, MO4I1 (2022).
- [44] L. Calabretta et al., Proc. of IPAC 2014, Dresden, Germany (2014) 788
- [45] P. McIntyre et al., Proc. of IPAC 2012, New Orleans, USA (2012) 436.
- [46] https://makezine.jp/blog/2019/08/mft2019_report_01.htm
↓

