

1. 超伝導電磁石加速器応用全般

高エネルギー加速器研究機構

荻 津 透

目 次

超伝導電磁石加速器応用全般

1	はじめに	1-1
2	超伝導の発見と超伝導電磁石の実現	1-1
2.1	超伝導の発見	1-1
2.2	超伝導現象の理解の進展	1-2
2.3	実用超伝導電磁石の実現に向けて	1-3
3	巨大加速器用超伝導電磁石の歴史	1-3
3.1	加速器超伝導電磁石の実現	1-3
3.2	HERA, SSC, そしてRHIC	1-6
3.3	LHC	1-8
3.4	HL-LHC	1-8
4	ハドロン加速器での応用	1-9
4.1	J-PARC	1-10
4.2	GSI/FAIR	1-11
4.3	医療用シンクロトロン	1-12
4.4	サイクロトロンの超伝導化	1-13
4.5	イオン源の超伝導化	1-13
5	電子加速器	1-14
5.1	電子・陽電子衝突型加速器	1-14
5.2	放射光施設	1-14
6	まとめ	1-16
	参考文献	1-16

超伝導電磁石加速器応用全般

1. はじめに

1983年に米国イリノイ州の Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) に世界で初めて全面的に超伝導電磁石を利用した大型陽子シンクロトロン TEVATRON[1]が完成した。この TEVATRON の成功は、その後ドイツ・ハンブルグにある Deutsches Elektronen-Synchrotron 研究所 (DESY) の Hadron-Electron Ring Accelerator (HERA) [2]や米国ニューヨーク州の Brookhaven National Laboratory (BNL) の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) [3]に繋がった。そして欧州原子核研究機構 (CERN) に 2008年に完成した世界最大の衝突型加速器である Large Hadron Collider (LHC) [4]に結びついている。

これらの巨大加速器実現のためには、多くの研究資源が超伝導電磁石の開発に費やされ、超伝導電磁石技術の発展に多大なる貢献をした。また多くの超伝導電磁石技術者を育て超伝導電磁石の研究開発コミュニティに一大勢力を作り上げ、そこからさらに中小規模の加速器への超伝導電磁石応用へと発展していった。

現在では、超伝導電磁石は放射光施設、サイクロトロン、医療用ガントリー、またイオン源など様々な加速器応用へと広がりを見せている。また近年急速に発展している高温超伝導材料 (HTS) 技術などの先進的な超伝導技術の発展は更なる応用の広がりの可能性を示している。実際、現在 LHC では実験の更なる効率化を目指して高輝度化アップグレードを行っているが、ここでは、これまで NMR などの一部の超高磁場応用でしか使われなかった Nb₃Sn という超伝導材料を使った超伝導電磁石が加速器応用として初めて実用化されようとしている。この様に加速器応用においても超伝導電磁石技術の大きな転換期がやってきている。

本講義では、巨大加速器における超伝導電磁石応用の歴史を紐解きながら、加速器用超伝導電磁石技術の基礎を講義する。その後、様々な超伝導

電磁石の加速器応用に関して紹介しその応用の広がりやそれぞれの応用における技術的課題などに関して詳述する。最後に今後の加速器計画において求められている超伝導電磁石技術とそれに応えるための研究開発の状況に関して述べていく。ここで述べる記述の多くは 2011 年度の OHO の講義ノート[5]、2019年に電気学会が出版した調査報告書[6]、2020年に加速器学会が出版した特集号[7]を引用している。また 2022年度の OHO は超伝導電磁石にテーマを絞っているため各応用例に沿ったより詳細な記述が他の講義ノートには記述される。これらの参考文献を参照されたい。ここで議論する磁石の多くは、シンクロトロンの磁石であるが、シンクロトロンについては OHO に多くの講義ノート (例えば[8][9]など) あるので参照されたい。

2. 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現

2.1. 超伝導の発見

1911年に超伝導が発見されてから 50年間の間に、超伝導現象に関して多くの物理的研究がなされ様々な発見があった。しかしながら、超伝導磁石の実用化が大きく進んだのは 1961年の NbTi の発見以降である。ここでは、超伝導の黎明期である最初の 50年間になされた発見について簡単に紹介していく。

超伝導の発見の 3年前、1908年オランダ・ライデン大学のカムリン・オネス (Heike Kamerlingh Onnes) はヘリウムの液化に世界で初めて成功し 0.9 K という極低温状態を作り出すことに成功している。オネスはこの極低温状態を利用して各種金属の電気抵抗を測定し、1911年に水銀が約 4.2 K で突然電気抵抗がなくなること (完全導電性) を発見しこの現象を超伝導と命名している [10]。オネスはこの後スズや鉛でも超伝導現象が起こることを発見している。

またオネスは 1913年に鉛線を使って超伝導電磁石の試作を試みるが非常に低い磁場で超伝導が破れてしまい高磁場を発生することができなかった。このことを受けてオネスはさらに詳細な研究を進め、超伝導状態が一定以上の磁場をかけ

ると消滅してしまう臨界磁場があることを発見している。当時発見されていた超伝導物質は、皆非常に低い臨界磁場を持っていたため超伝導による磁石というアイデアはしばらく封印されることとなる。

1933年にはヴァルター・マイスナー (Fritz Walther Meißner) とローベルト・オクセンフェルト (Robert Ochsenfeld) によって超伝導体が完全反磁性を持つことが発見される[11]。この効果はマイスナー効果 (Meissner effect) と呼ばれ、現在では完全導電性ととも超伝導体を決定するための2大特徴となっている。

2.2. 超伝導現象の理解の進展

1950年になると熱力学的視点で超伝導現象を説明するギンツブルグ・ランダウ理論 (GL理論) [12]がギンツブルグ (Vitaly Lazarevich Ginzburg) とランダウ (Lev Landau) によって導出される。GL理論では、既にLondon兄弟によって提案されていた超伝導体への磁場侵入の特性長を示すロンドン侵入深さ (London Penetration Depth) λ [13]の他に、もう一つ超伝導の特性長を示すパラメータとしてコヒーレンス長 (Coherence length) ξ と呼ばれるパラメータを導入した。

GL理論では超伝導体の界面でロンドン侵入深さが負のエネルギーを与える一方、秩序長さが正のエネルギーを与えることを示した。完全反磁性を示す超伝導体では $\xi \gg \lambda$ であるため界面エネルギーは正となり、界面を極力減らした方がエネルギー収支的に有利である。超伝導とそうでない部分の界面を極力減らす解は超伝導体表面だけを界面とする解となるため、必然的に磁場は超伝導体から追い出される形になる。このような超伝導体を、後述の第2種超伝導体に対して、第1種超伝導体という。

1957年には超伝導の微視的な説明を与えるBCS理論[14]がバーディーン (John Bardeen)、クーパー (Leon Neil Cooper)、シュリーファー (Robert Schrieffer) によって提唱され、クーパー対 (Cooper Pair) と呼ばれる電子対が超伝導現象の担い手となっていることが示された。

同じく1957年に、ロシアのアブリコソフ (Alexei Alexeevich Abrikosov) がGL理論を用いて完全反磁性ではない混合状態 (Mixed State) を作る第2種超伝導体の存在を理論的に予言する[15]。混合状態は、ウクライナ (当時ソ連) のハルキウ物理科学研究所のLev Shubnikovによって1935年に実験的に発見されていたが、Shubnikovがスターリンの大粛清の犠牲になったため、1957年に名誉回復されるまで発見が表に出ることはなかった。

2種超伝導体では $\xi < \lambda$ (正確には $\sqrt{2}\xi < \lambda$) で前述の界面エネルギーが負となっている。この場合超伝導と常伝導の界面は多ければ多いほど安定になる。従って磁場が超伝導体かけられると磁場は超伝導体内部に小さな常伝導の「島」を作って侵入して行く。このとき界面の量は多いほど安定なので「島」は (原理的には) 磁束の最小単位まで分割される。このときの磁束の最小単位はクーパー対が作る磁束となる。

この第2種超伝導体の発見が、超伝導磁石の実現に向けて非常に重要になった。1つは実質的な臨界磁場の違いである。主要な超伝導物質の臨界磁場をTable 1にまとめている。第1種超伝導体では B_c がかなり低いのに対して、多くの第2種超伝導体にとって実用上の臨界磁場である B_{c2} は非常に高い値を取っている。また第1種超伝導体では完全反磁性のために、超伝導体の極薄い表面にしか電流が流せず臨界電流も非常に低い。それに対して第2種超伝導体の混合状態では、超伝導体全体に分散して電流が流せるため臨界電流が高くなることできる。

Table 1 超伝導体の臨界温度と臨界磁場

種類	材料	Tc	Bc(Bc2)
1種	Hg	4.2K	~0.04T
	Pb	7.2K	~0.08T
2種	Nb*	9.25K	~0.3T
	NbTi	9.1K	11.5T
	Nb ₃ Sn	18.3K	22.5T

*非常に純度が高くよくアニールされたNbは、限りなく1種に近い特性を示す。

2.3. 実用超伝導電磁石の実現に向けて

カマリン・オネスが超伝導発見当初、既に超伝導磁石を試作したことは既に述べたが、その後超伝導磁石の進展は止まってしまう。しかし1954年に米国で G.Yntema が温度 4.2K で 0.71T を達成する超伝導磁石を開発すると状況は一変する。この磁石に使った超伝導線は冷間加工した Nb 線と線としては 1.7 K, 0.5 T で 1000A/mm² を達成している。

第2種超伝導体の混合状態では、超伝導体の中に磁束と電流が混在するため、磁束に電磁力がかかり磁束を止めておく力が無いと磁束は動いてしまう。このような状態を磁束フロー状態 (Flux Flow State) と言い、この状態では損失が生じる。実際の第2種超伝導体では、ピン (pin) と呼ばれる格子欠陥や不純物などによって超伝導状態が破れる可能性の高い場所が存在し、そこに磁束が補足され動かなくなる。この磁束を補足する力をピン止め力 (pinning force) と呼び臨界電流密度を決める重要なパラメーターになる[16]。Yntema の Nb 超伝導線は、冷間加工をしたことによってピンの要因となる格子欠陥が多く材料内に導入され結果的に臨界電流が向上したと考えられる。

Yntema の結果を受けて米国 Bell 研究所の J.E. Kunzler 達が精力的な研究を行い、1959年に Mo₃Re で 1.5K, 1.5T, 500A/mm² の超伝導線を開発し翌年には同じ線を使って 1.5T の超伝導磁石を開発して世界で初めて超伝導磁石の特許を取得している。1961年には Nb₃Sn で 1.5K, 9T, 1000A/mm² を達成し、これで 6.8T の超伝導磁石を開発している。

臨界磁場や臨界電流の点では良好な性能を発揮した Nb₃Sn であるが金属化合物であるために脆く電導線としては扱いづらい物であった。このため 1962年に J. Hulm と T. Berlincourt によって合金系の NbTi 線(440 A/mm² @ 3 T, 4.2 K)が開発されると、10T を超えるような高磁場応用をのぞくと、主役の座を NbTi に明け渡してしまう。NbTi は合金である為に延性があり扱いやすかったため、臨界磁場、臨界温度ともに Nb₃Sn よりも低か

ったにもかかわらず、今日の超伝導磁石応用の主役となる。

1960年代に入って超伝導磁石やその線材は著しい進展を遂げた。しかしながら初期に開発された磁石は非常に不安定で、度々極端に低い電流値でクエンチと呼ばれる突発的な常伝導転移を起こしてしまうことがあった。この不安定生の原因の一つとなっていたのが磁束跳躍 (Flux Jump) と呼ばれる現象である。磁束跳躍は、超伝導体に流れる遮蔽電流によって生じる交流損失が材料の温度上昇を引き起こすことによって生じる熱磁気不安定性で交流損失と同じく材料をより細くすることで妨げることができる。これを現実的な超伝導線を実現したのが極細多心線と呼ばれる複合線である。極細多心線は、NbTi などの超伝導材料を細いフィラメント状にして銅の母材に埋め込んだもので 1970年代に実用化されている [17]。

3. 巨大加速器用超伝導電磁石の歴史

1960年代に入り高磁場を実現できる超伝導電磁石が研究室レベルで実現される様になると、素粒子物理の研究者たちがこの技術に着目する様になる。この頃、素粒子物理の世界ではより高度な物理の発見を求めて、粒子加速器の高エネルギー化が求められるようになっていたが、この頃主流のシンクロトロンでは、高エネルギー化のためには、加速器の大型化と磁石の高磁場化が必須であった。そこで素粒子物理学者や加速器技術者の間で磁石の高磁場化のために超伝導電磁石を利用することが真剣に議論される様になる。

3.1. 加速器超伝導電磁石の実現

3.1.1. 開発競争の始まり

1970年代に入ると、米国では TEVATRON と ISABELLE という2つの超伝導シンクロトロンの計画が提案され、それぞれの計画を提案した FNAL と BNL がこれらの加速器実現に向けて重要な部分となる超伝導磁石の開発を競い合う様に行った。またヨーロッパでもシンクロトロンの超伝導化を目指した開発が進められる。これらの

開発が超伝導磁石技術の進歩を著しく加速し、前述の極細多心線の量産技術の確立など超伝導電磁石の量産化技術の確立に向けて大きな貢献をした。これにより超伝導電磁石技術は、MRIのような一般利用も現実的に実現できるレベルになる。事実 TEVATRON の最初のプロトタイプ磁石は1977年に開発されたが、最初の超伝導MRIはほぼ同じ時期の1979年に実現された。加速器分野での開発がなければ超伝導MRIの実用化は、10年程度遅れたであろうと言われている。

米国の2大研究所の開発競争は超伝導ケーブルの選択の違いから大きく明暗が分かれる。FNALはイギリスで開発されたRutherford Cableと呼ばれる1mm弱程度の極細多心超伝導素線を数十本矩形に撚り合わせたケーブルを選択したのに対し、BNLはより細い極細多心超伝導素線をブレード状に編み合わせたケーブルを採用した。Rutherford cableは機械的な安定性が高く製作された磁石も比較的安定した性能を示したのに対し、ブレード線は素線がキレやすく機械的な安定性も低かった。このため磁石製造時に素線が切れて絶縁不良を起こすことが多く、また製造後の性能もあまり安定しなかった。このためBNLは途中からRutherford cableに切り替えて開発を進めたが、開発は大幅に遅れISABELLE計画は中止されてしまう。

一方TEVATRON用の超伝導電磁石の開発は順調に進み、1977年に最初のプロトタイプが完成し、1983年には加速器が完成、1984年に運転が開始される。

3.1.2. $\cos \theta$ 分布コイル

ここでシンクロトロンにおいて主要な磁石である2極磁石と4極磁石について簡単に説明しておく。超伝導電磁石において2極磁石は、一般に $\cos \theta$ 分布コイルを用いて実現される。Figure 1に $\cos \theta$ 分布電流によって作られる均一磁場の模式図を示す。ここでは、2つの均一電流を流す円筒形の導体を考える。2つの導体の電流は同じ値で逆向きとする。それぞれの導体の中には導体の中心から中心からの距離に比例して大きくなる円

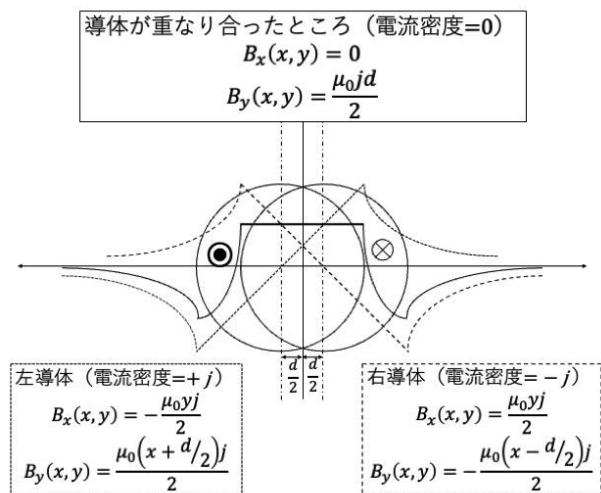


Fig.1 $\cos \theta$ 分布コイル

環状の磁場が生じる。この2つの導体を重ね合わせると重なった場所では電流が打ち消しあって電流のない領域ができ、その両側には三日月状の電流分布が生じる。また中央の電流のない領域の磁場を計算するとFigure 1に示されるように均一な磁場が発生していることがわかる。この時両側の三日月状の電流分布は三日月を薄くした極限では電流の厚さが $\cos \theta$ で表されるためこの様な分布を模擬したコイル形状を $\cos \theta$ 分布コイルと呼ぶ。またそこに発生された均一な磁場は、2極磁場と呼ばれ、その中を通る荷電粒子を一定の曲げ半径で偏向させる。また電流分布を $\cos 2\theta$ で発生させるとその内側には磁石中心からの距離に比例して大きくなる磁場：4極磁場が発生する。4極磁場は、ビームを収束もしくは発散させる効果を持つ。この2極磁石と4極磁石は、シンクロトロンの主要な磁石で、例えばTEVATRONでは4極磁石1台と2極磁石4台でFODOと呼ばれる加速器の基本セルの半分(ハーフセル)を構築した。最初のハーフセルの4極磁石が収束(Focusing)であれば次のハーフセルの4極磁石は極性を反転して発散(De-focusing)となる。シンクロトロンはこのFODOセルを連続的に並べることで、2極磁石でビームを偏向させながら4極磁石でビームを収束させて軌道内を安定的にビーム移送する[8]。

3.1.3. TEVATRON

TEVATRON は、既存の周長 6.3 km、400 GeV の常電導 Main Ring のアップグレード版で磁場 4.4 T 長さ 6.12 m の超伝導 2 極電磁石 774 台および磁場勾配 76 T/m 長さ 1.68 m の 4 極超伝導電磁石 216 台を併設し、エネルギーを倍以上の 1 TeV に上げたため Energy Doubler と呼ばれた。常電導の Main Ring は入射加速器として 150 GeV までの加速に利用し、そこから 1 TeV まで TEVATRON で加速した[18]。

TEVATRON は、固定標的実験モードと陽子・反陽子衝突実験モードの 2 つの運転モードがある。固定標的実験モードでは運転サイクルが約 1 分と比較的早かったため、超伝導電磁石で生じる交流損の低減が必須となった。超伝導素線は、直径 0.68 mm、銅比 1.8、NbTi フィラメント数 2050 本、NbTi フィラメント平均直径 8.7 μm 、ツイストピッチ 12.7 mm で設計された。また素線 23 本を幅 7.8 mm、平均厚さ 1.26 mm、キーストン角度 9.13 度、ツイストピッチ 57 mm のラザフォード形状に撚ったケーブルは、酸化銅で表面を覆った素線と銀錫メッキで表面を覆った素線を交互に並べたゼブラケーブルと呼ばれるものが利用された。これは、交流損を減らしながらケーブルのクエンチ安定性を確保することをめざしたものであった。これらの工夫の結果、固定標的モードでの運転サイクル周期 60 秒あたりの交流損は電磁石 1 台あたり約 500 J だった[19]。

超伝導ケーブルには電気絶縁として 50% オーバーラップで 25 μm 厚のカプトンテープがスパイラル状に巻かれさらにこの上にエポキシ樹脂を染み込ませたガラステープがスパイラルギャップ巻きされていた。巻線後は、このエポキシ樹脂を反応させることによってコイルを成形した。このためコイル内部には液体ヘリウムが入り込める隙間ができそれによって超伝導線が液体ヘリウムで直接的に冷却することで安定性を増すことをめざした。

TEVATRON 用の超伝導 2 極電磁石の断面図を Figure 2 に示す。コイルは、適度なキーストンアングルがあるケーブルを積み重ねてローマンア

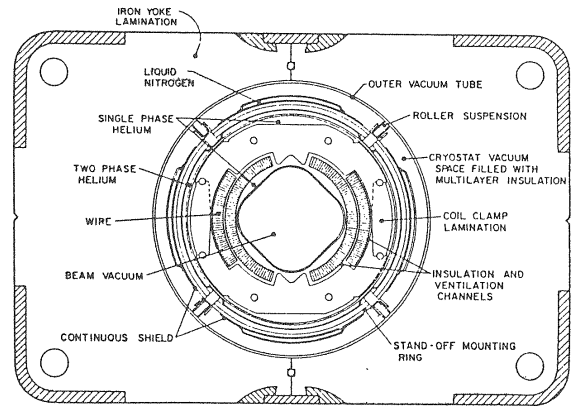


Fig.2 TEVATRON 用超伝導 2 極電磁石

ーチ形状に巻いた鞍型コイルを作った。TEVATRON ではこの鞍型コイルを 2 層にして後述する $\cos \theta$ コイル形状を作っている。内層コイルは、ミッドプレーンからポールまでの角度が 72 度で、外層コイルは 36 度となっている。このコイルをステンレスのカラーで拘束して予備応力をかけて電磁力に対して保持した。ここまでの構造をカラードコイルと呼ぶが、TEVATRON で開発されたカラードコイルの概念はその後ほとんどの加速器用超伝導電磁石の構造に引き継がれている[18]。

一方リターンヨークとなる鉄は室温側に取り付けられるウォームアイアン方式がとられた。この場合鉄とカラードコイルの間には断熱真空層が必要となり、カラードコイルを重力や電磁力に対して支持する断熱サポートが必要になる。この方式では断熱サポートの調整次第でカラードコイルのリターンヨーク内での位置が変わるためそれによる磁場誤差が生じることになる。TEVATRON では、この事実を逆手にとって製作時にカラードコイルに生じた 4 極磁場の誤差をアライメントによって補正することをした[19]。一方で 2000 年代の運転では断熱サポートの経年劣化によってカラードコイルがリターンヨークに対して落ちてしまい、スキュー 4 極磁場が生じ加速器運転に支障をきたす事態を生じさせている[20]。

TEVATRON 用の超伝導 4 極電磁石の断面図を Figure 3 に示す。磁石の機械的な基本構造は 2 極磁石と同じカラードコイルをクライオスタット

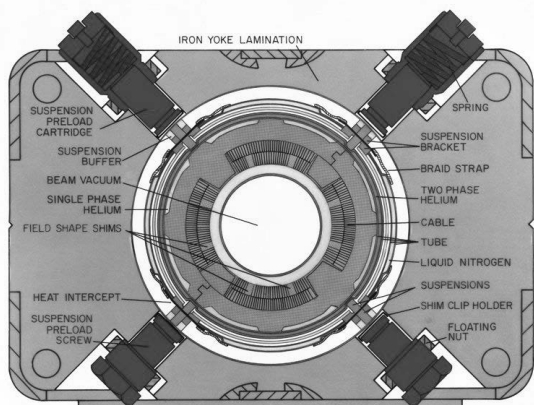


Fig.3 TEVATRON 用超伝導 4 極電磁石

介してウォームアイアンで囲んだ構成となっている。ただし、超伝導 4 極電磁石では、コイルの構成が後述する $\cos^4 \theta$ 分布を模擬したものになる。カラードコイルとウォームアイアンの芯ズレが誤差磁場を生むことは 2 極磁石と同様であるが 4 極磁石の場合例えば上下方向の芯ズレは、スキュー 2 極磁場やスキュー 6 極磁場に誤差磁場を生む。

超伝導電磁石システムにおいて消費電力のほとんどは磁石を極低温に冷やすための冷凍機によって費やされる。TEVATRON では、消費電力約 300 kW のサテライト冷凍機 24 台と 3.6 MW の Central Helium Liquefier (CHL) が磁石冷却のために使われた[21]。TEVATRON を 800 GeV で運転した場合の Main Ring と TEVATRON の合算消費電力は Main Ring 単体での 400 GeV 運転時の約半分です月に 15 GWh (10 M\$相当)程度の電力が節約された[19]。ここでは液体窒素がヘリウムのサテライト冷凍機や CHL でのヘリウムの一次冷却やクライオスタットのシールドの冷却に使われていたが、その経費や冷凍機運転の人員費などを考慮しても 3.3 M\$程度の運転経費節約になったと考えられている。またビームエネルギーが倍になったことを考えると常電導電磁石で 800 GeV を実現するには倍のサイズの加速器が必要になり消費電力も倍になったと考えられ消費電力だけで考えれば 4 倍程度の差があると考えられる。さらに上

記の消費電力は固定標的モードでの比較であり、フラットトップで保持する時間が圧倒的に長くなる衝突実験モードではさらに開いて全体では 10 倍程度の差が開くと考えられる。

3.2. HERA, SSC, そして RHIC

TEVATRON の成功を受けて世界中で HERA, SSC, RHIC などの新たな超伝導シンクロトロン計画が立ち上がった。この章ではこれらの計画で開発された超伝導 2 極電磁石について説明していく。

3.2.1. HERA

HERA は、ヨーロッパで最初に作られた大型の超伝導加速器で 1992 年に完成した。超伝導電磁石を利用した 920 GeV の陽子リングと常伝導電磁石による 27.5 GeV の電子リングにより電子陽子の衝突実験を行なった。周長は 6.3 km で磁場 4.7 T で長さ約 9 m の超伝導 2 極電磁石が 422 台トンネル内に並んだ。HERA 用の超伝導 2 極電磁石の断面を Figure 4 に示す。HERA では、TEVATRON と同じようなカラードコイル構造が採用されたがリターンヨークとなる鉄はカラードコイルに直接取り付けられたコールドアイアン構造を取っている[22]。この構造では TEVATRON で行ったようなサポート構造の調整による磁場補正はできなくなるが、構造は安定するため誤差磁場が経年劣化で生じてしまうリスクは避けられる。HERA 以降の加速用超伝導電磁石の多くはコールドアイアン構造を取っている。

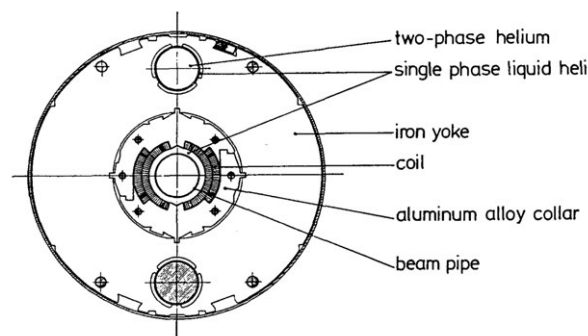


Fig.4 HERA 用超伝導 2 極電磁石

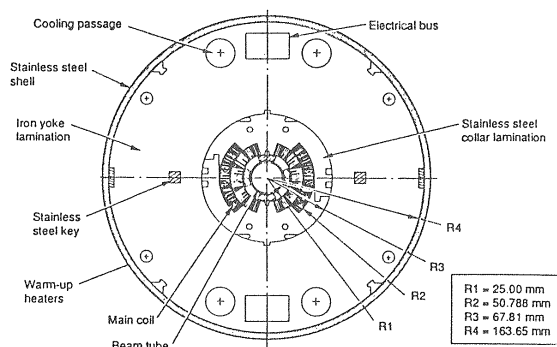


Fig.5 SSC 用超伝導 2 極電磁石

3.2.2. SSC (Superconducting Super Collider)

SSC は米国テキサス州に計画された周長 87km の巨大な加速器で磁場 6.8 T で長さ 15 m の超伝導 2 極電磁石が 4000 台程度加速器内に並ぶ予定で完成していれば、LHC をはるかに超える重心エネルギー 40 TeV の陽子陽子衝突実験が実現するはずであった。しかしながら 1988 年に建設が開始された SSC は、建設経費の高騰を理由に 1993 年に米国議会によって中止が決定されてしまう [23]。

SSC 用超伝導 2 極電磁石の断面図を Figure 5 に示す。SSC 用の超伝導電磁石は、HERA と同じカラードコイルをコールドアイアンに収めた構造になっている。SSC 用の磁石では、かかる磁場の低い外層コイルの超伝導線の厚さを内層コイルのものより薄くすることによって電流密度を上げ燃り効率よく磁場を発生できる様になっている。

技術面で SSC の超伝導電磁石が直面していた問題の一つに電磁石の励磁速度依存性があった。SSC の超伝導電磁石は最終段の衝突型加速器だけでなくその前段の HEB (High Energy Booster) にも用いられる予定であった。HEB は入射加速器の特性上 2~3 分程度の比較的早い運転サイクルが求められていたため、電磁石の励磁速度もそれに相応した速さが求められた。そこで開発された超伝導 2 極電磁石について速い励磁速度での試験が行われた。しかしながら多くの電磁石が比較的大きなクエンチ電流の劣化を示したと同時に、幾つかの

電磁石は励磁中に励磁速度に比例した大きな誤差磁場を生じさせた。

この現象は、その後の研究で素線間の接触抵抗が異常に低くなってしまったことによることで生じた不均一で異常に大きな素線間結合電流が原因であることがわかっている [24]。現在ではケーブルの素線間抵抗値の制御の重要性は十分に認識され、素線にかけた銀錫メッキに酸化膜を導入したり、ラザフォード・ケーブルの中心にステンレスのフォイルを挿入したりすることで制御する努力がなされている。今後、ラザフォード・ケーブルを用いた $\cos \theta$ コイルによる超伝導電磁石が早い運転サイクルの加速器に応用されていくかどうかはこの素線間抵抗の制御技術がどこまで確立されていくかにかかっている。

3.2.3. RHIC

RHIC は ISABELLE 用に建設した加速器トンネルに磁場 5.1 T で長さ 9.4 m の超伝導 2 極電磁石が約 400 台並んだ重イオン加速器で 1998 年に完成した。RHIC 用の超伝導 2 極電磁石の断面図を Figure 6 に示す。RHIC では、超伝導電磁石の SSC の反省から構造の徹底した合理化が図られる [25]。ステンレスカラーは廃止されカラーが入るべきスペースに絶縁を兼ねる射出成形されたガラス強化フェノールプラスチックが採用されその周りにプラスチックカラーとコイルを拘束するヨークカラー構造が採用された。これによって電磁石製作工程は大幅に合理化された。同様の構

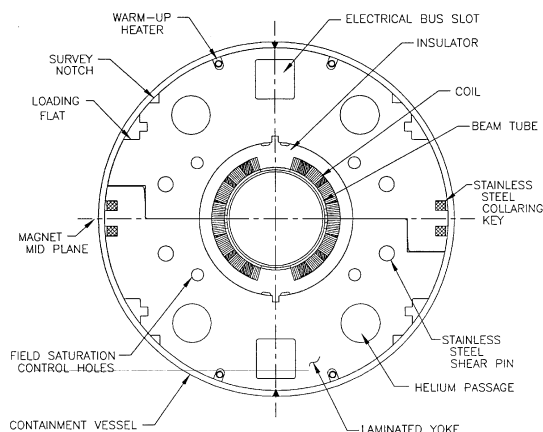


Fig.6 RHIC 用超伝導 2 極電磁石

造は後述する KEK で開発された J-PARC ニュートリノ実験施設の陽子ビームライン用超伝導電磁石に採用された。

3.3. LHC

LHC は 2008 年から稼働している陽子・陽子衝突型加速器で素粒子 Higgs 発見に大きな貢献をしたことは記憶に新しい。この加速器は 8 つのアーキ部と直線部から構成され全長で周長 27 km の加速器リングが構成されている。

3.3.1. LHC アーク用超伝導 2 極電磁石

LHC のアーキ部は、長さ 14.2 m で磁場 8.36 T の超伝導 2 極電磁石 6 台と磁場勾配 223 T/m の超伝導 4 極磁石 2 台（それぞれビームの収束と発散を担う）セットになって FODO セルを構成し、このセル 23 個で 2.45 km のアーキを構成する。LHC アーク用の超伝導 2 極電磁石(Figure 7)[26] は、温度 1.9 K で 1 気圧の加圧超流動ヘリウムで冷却することで、磁場 8.3 T での定格運転を可能にしている。また 1 つの鉄ヨークの中に 2 つの $\cos \theta$ コイルが入った Two-in-One 構造をとることでお互いのコイルが相手の磁束リターンとして効率的に磁場を発生する設計になっている[26]。

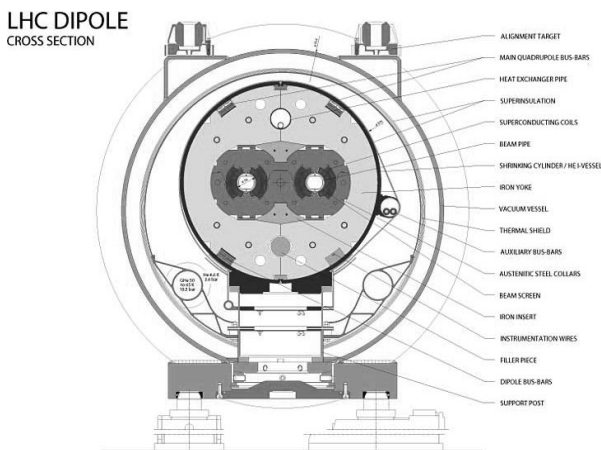


Fig. 7 LHC アーク用超伝導 2 極電磁石

3.3.2. LHC 衝突点用超伝導 4 極超伝導電磁石

直線部のうちの半分の 4 つは衝突実験を行うための衝突点を含みそこには、衝突点に向かって

ビームを絞り込むための最終収束 4 極超伝導電磁石が設置されている。この中でも最も衝突点に近く最も磁場の高い磁石が KEK によって開発され、LHC で現在も稼働している (Figure 7)[27]が使用されている。この電磁石は 4 層の $\cos 2\theta$ コイルで最大経験磁場 8.63 T を発生させ、運転中の加速器用電磁石としては世界最高磁場を誇っている[27]。

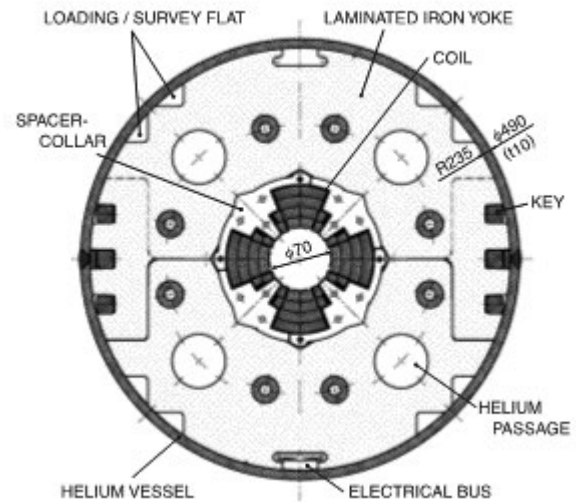


Fig. 8 LHC 衝突点用超伝導 4 極電磁石

3.4. HL-LHC

LHC は、2008 年の運転開始以降、ハンダ不良による事故などもあったが、順調に実験成果をあげ Higgs の発見などに貢献した。しかしながら、2020 年代に入ると実験統計の積み上げ効果が鈍ってくることで、衝突点近傍の超伝導電磁石群が放射線劣化により交換が必要になるなどの理由から、LHC 高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が提案・承認され現在建設に向けて開発が進められている。これは、衝突点近傍の磁石群を中心に加速器の一部を改良することで陽子衝突確率を上げ実験精度の向上をめざす計画である[27]。

3.4.1. 衝突点 4 極超伝導電磁石

ここで最も重要な役割を果たすのが衝突点用ビーム収束磁石 MQXF (Figure 9) [28]で、磁石の口径を現状の倍以上の 150 mm とすることで衝突

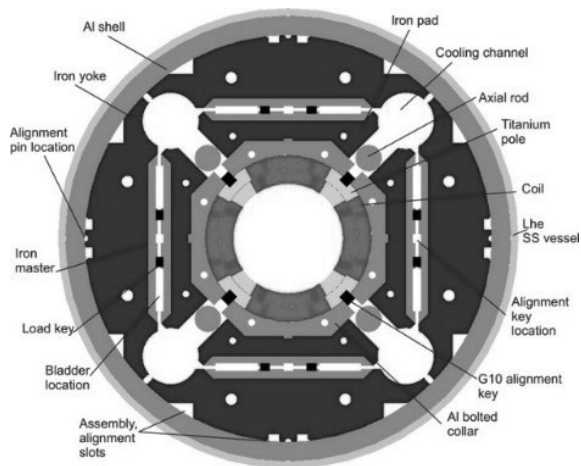


Fig. 9 HL-LHC 衝突点用超伝導 4 極電磁石

確率を大幅に向上することをめざす。磁場勾配は 132.6 T/m でコイル最大経験磁場は 11.4 T となり、加速器応用では初めて Nb₃Sn 線が実用される。コイルの応力制御のため、肉厚のアルミシェルを用いて冷却時にコイルの予備応力が増強される特殊な構造をとる。この Nb₃Sn 超伝導電磁石の開発においては、米国が大きな役割を果たしている。米国では、LHC において将来アップグレードが必要になると考え 2005 年から LARP (LHC Accelerator Research Program) を立ち上げ LHC アップグレードに向けて加速器関連の研究開発をリードした。その中で Nb₃Sn を用いた高磁場超伝導電磁石の開発は、主要な開発課題と捕らえられた。超伝導電磁石の開発は BNL、FNAL、LBNL の 3 研究所と Oxford Instruments などの民間企業などが協力し Nb₃Sn 超伝導線の高磁場での臨界電流密度の向上とその線を用いた超電動電磁石の開発が精力的に行われた。10 年以上の期間に渡って総額 200 億円近い開発費を投入し開発を進め、今日の HL-LHC に用いる MQXF の基盤となる技術を確立した。実際 MQXF の設計は、LARP において開発された超伝導 4 極電磁石 HQ に対して口径を 120 mm から 150 mm に広げそれに伴って外径を 570 mm から 630 mm に大きくしている他は構造的にはほぼ相似形となっている。

3.4.2. ビーム分離用 2 極超伝導電磁石

また収束電磁石の手前には衝突点で一つのビームチューブに合流されているビームを 2 つのビームチューブに分離する 150 mm 口径で 5.6 T の 2 極電磁石 (Figure 10) [29] が必要で、KEK において開発が進められている。この電磁石は NbTi だが大口径ゆえの難しさがああり、ニュートリノビームラインで培われた大口径加速器超伝導電磁石の技術が生かされている。

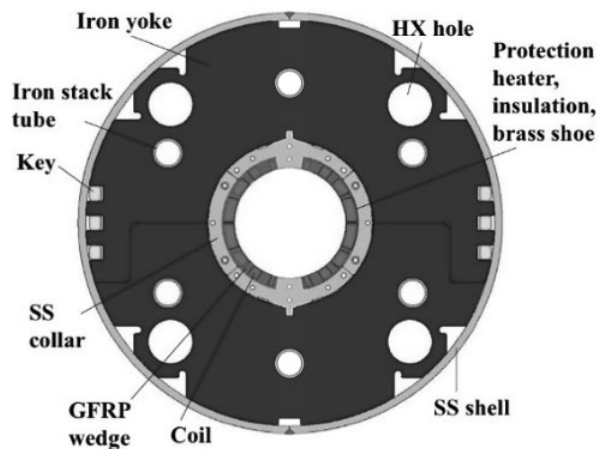


Fig. 10 HL-LHC 衝突点ビーム分離用超伝導 2 極電磁石

4. ハドロン加速器での応用

高エネルギーの巨大加速器で超伝導電磁石の応用が進むと一般の加速器応用においても徐々に超伝導電磁石の応用が進む様になる。特に陽子や重イオンといった比較的重い粒子を扱う加速器においては高磁場化が必要になるケースが多く応用が進む。しかしながら、TEVATRON の例で既に述べたように、粒子の取り出しを伴うシンクロトロンにおいては加速器の早いサイクルの運転が必須となるため、加速器本体に超伝導電磁石を利用するためには早い運転サイクルに伴う交流損失や結合電流による誤差磁場の問題などを解決しなければならず、シンクロトロン本体への応用は進まなかった。一方ビームを取り出してからの利用においては、ビームのエネルギーが固定されているケースが多く磁石も直流運転で良

いたため超伝導電磁石の応用が進んだ。ここでは、ビーム取り出し後の応用例として、J-PARC での各種固定標的実験での超伝導応用の利用に関してまず紹介する。また超伝導電磁石技術の進展に伴い徐々に早いサイクルに対応できる超伝導電磁石の開発も進めそれを利用したシンクロトロンでの応用例も増えてきている。代表的な例としてドイツ GSI の FAIR 計画の例を紹介する。また早いサイクルに対応した例として炭素線によるガン治療装置におけるガントリーの超伝導化及びその発展形で現在開発が進む医療用シンクロトロンの超伝導化についても紹介する。

ビームの加速に磁石の磁場を上下しなければならないシンクロトロンに対してサイクロトロンは磁場を固定したままビームの加速ができる。このためサイクロトロンの磁石は固定磁場でいいので超伝導化に向いており、実際かなり早い時期からサイクロトロンへの超伝導電磁石応用は進んだ。また近年では、イオン源の収束系に超伝導電磁石を使う例も出てきている。これらについても簡単に紹介したい。

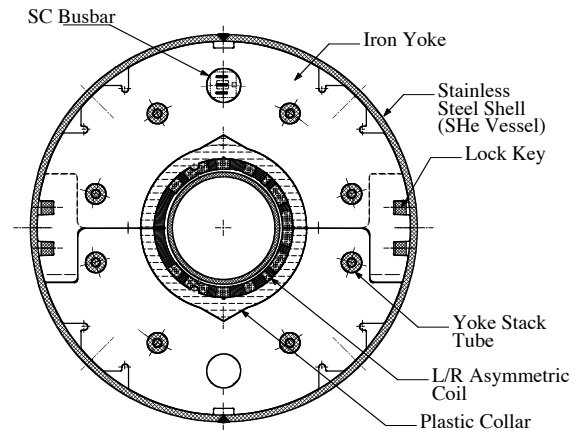
4.1. J-PARC

J-PARC には 3 GeV Rapid Cycle Synchrotron (RCS) と現在 30 GeV で運転中の Main Ring (MR) の2つのシンクロトロンがある。RCS は 25 Hz で MR は約 1 Hz での運転をするため、磁石もそのサイクルで磁場を上下することが求められ、シンクロトロン本体に超伝導電磁石を用いるのは、交流損失や結合電流による誤差磁場の問題などから困難と考えられ、超伝導化は見送られた。一方、ビーム取り出しを行った後であればビームのエネルギーが一定であるため、ニュートリノ実験施設でのビームライン磁石や陽子を標的に当てた後の二次粒子であるミュオンの捕獲・輸送などに超伝導電磁石が使われている。本章では、これら J-PARC で現在利用中及び建設中の超伝導電磁石システムについて簡単に紹介していく。

4.1.1. Neutrino 実験施設用ビームライン磁石

Neutrino 実験施設の陽子ビームラインは J-PARC MR から取り出した 30 GeV 陽子を神岡の方向へ向かって約 90 度曲げる機能を持つ。ビームラインは施設の土地の制約から MR からリングの内側に取り出すことが求められた。このためこのビームラインには比較的高磁場を高効率に発生できる超伝導電磁石システムが求められた。一方で建設の為の予算と予定には非常に厳しい制約があり、非常に短い期間に安価にシステムを建設することが求められた。そこで超伝導電磁石建設の合理化を図るため $\cos \theta$ 分布と $\cos^2 \theta$ 分布を足し合わせた左右非対称な電流分布を 1 層のコイルで実現することで 2 極 4 極複合磁場をもった超伝導結合機能型電磁石 (Superconducting Combined Function Magnet: SCFM) (Figure 11) を開発した[30]。これによってこの電磁石は偏向と集束の両方の能力を兼ね備えることになり 1 種類の電磁石でビームラインを実現

a) Cross Section



b) Tunnel Overview



Fig.11 J-PARC Neutrino BL SCFM System

できる。このような超伝導電磁石は世界で初めての試みであった。またさらなる経済性の最適化のため、RHICで採用されたプラスチックカラーと鉄ヨーク支持構造を採用している。またその他にも同時期に建設が進んでいたLHCの部品を極力利用する等のコスト最適化を図った。システムは2008年末に完成、3ヶ月のシステム試運転の後[31]、2009年4月に無事ビーム試運転に成功し[32]、現在まで問題なく物理実験に供与している。

4.1.2. MLF Muon Beam Lines

J-PARCのMaterial and Life science Facility (MLF)では、中性子ビームラインとMuonビームラインがあり、Muonビームラインには超伝導ソレノイドのシステムがミュオンビーム輸送のために設置されている。最初に設置された軸収束超伝導ソレノイドは、崩壊Muonビームライン(D-Line)に設置されたもので1980年からKEKつくばキャンパスで利用されてきたものを移設したものであった。その後超低速ミュオンビームライン(U-Line)にS型の湾曲ソレノイドSuper Omega (Figure 12)が設置されている[33]。最初に設置されたD-Lineのソレノイドも2016年に新しいソレノイドに交換されている[34]。



Fig.12 J-PARC MLF ultra-slow muon beam line curved solenoid

4.1.3. COMET

COMET (COherent Muon to Electron Transition) 実験は、J-PARCのハドロン実験施設で建設中の実験設備で大型の超伝導ソレノイドシステムを

使う実験である[35]。この実験のPhase 1では最大中心磁場5Tの捕獲ソレノイドの中にある標的にJ-PARC MRからの8 GeV陽子ビームを当て世界最大強度のMuonビームを生成、それを中心磁場3Tの90度湾曲ソレノイドで移送し、その先にある検出機ソレノイドの中にある検出機でMuon電子の稀崩壊過程の観測を行う。COMETの超伝導ソレノイドシステムは、2022年8月現在建設が推進中である。

4.1.4. g-2/EDM

g-2/EDM 実験は、Muonのスピンの歳差運動を使って異常磁気能率(g-2)や電子双極子能率(EDM)を非常に高い精度で測定する実験である[36]。この実験では、J-PARC MLF Muon施設のH-Lineで生成される超低速Muonを300 MeV/cの運動量まで加速して非常に指向性の高いMuonビームを作り、それを3Tで磁場均一度が1 ppm以下の超伝導蓄積ソレノイドに入射し、半径333 mmの軌道に蓄積する。蓄積されたMuonは、再差運動をしながら崩壊しそのスピンの方向に従って陽電子を放出する。その陽電子の飛跡を検出することで測定を行う。ここで蓄積ソレノイドの磁場制度は、物理実験の精度を決定する非常に重要なパラメーターとなるため高精度なソレノイド及びその磁場を即成する磁場測定システムの開発が精力的に続けられている[37]。

4.2. GSI/FAIR

ドイツのイオン研究所GSIは、線形加速器(UNILAC)とシンクロトロン(SIS18)により、ウランウムまでの重イオンビームを加速・利用する施設である[38]。

GSIではFAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) 計画が進行中で、SIS18を入射器とする重イオン加速器SIS100が建設中である。この加速器は、1.9 Tの超伝導偏向電磁石を1 Hz (4 T/s)の比較的速いサイクルで運転することで、効率的な重イオン加速を実現する。この電磁石は、ウィンドウフレーム型の鉄ヨークを用いたスーパーフェリックと呼ばれるタ

イブの電磁石で、超伝導ケーブルは冷却管の周りに超伝導線を巻きつけたもので、運転電流は 13.1 kA である (Figure13) [39]。

また GSI では、将来計画として $\cos \theta$ 巻きの 4.5 T の超伝導 2 極電磁石を 1 T/s で励磁して SIS100 の 3 倍のエネルギーの加速器を実現する SIS300 も計画している[40]。

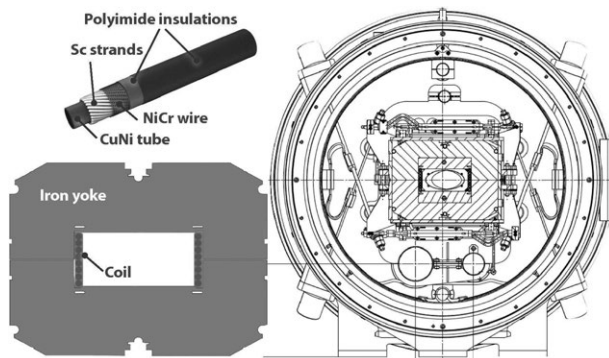


Fig. 13 FAIR SIS100 2 極磁石 (1.9 T, 4.5 K)

4.3. 医療用シンクロトロン

炭素線など重イオンを使った医療用シンクロトロンは、その治療実績から日本では応用が進んできているが、比較的高エネルギーの重イオンを制御する必要性から加速器やビーム取り出しラインなど施設が大型化しやすい欠点があった。このため放医研では、磁石を超伝導化することで施設の小型化を目指し、その手始めにガントリー超伝導化を実現した。現在では施設のさらなる小型化を目指してシンクロトロン本体の超伝導化に向けた開発も行なっている。本章ではこれらの磁石の開発について簡単に紹介する。

4.3.1. 超伝導ガントリー

炭素線治療用回転ガントリーは、常伝導電磁石を用いたものがドイツにおいて開発されていたが総重量 600 t の巨大なもの[41]で普及には向いていなかった。そこで普及に向け、超伝導回転ガントリーの研究開発が放医研にて行われた[42]。この回転ガントリーは、10 台の超伝導電磁石、1 対のスキヤニング磁石、3 対のステアリング磁石及びビームプロファイルモニターにより構成され

[43]、これらビーム輸送機器は全て円筒形状の回転構造体上に搭載されている。これにより、炭素イオンビームを患者に対し ± 180 度の如何なる方向からも照射を行うことができる。また、小型・軽量の超伝導電磁石を採用したことで、全長 14 m (両端エンドリング間の距離)、ビーム軌道半径 5.45 m、重量 300 t 台と従来の超伝導電磁石を採用した炭素線治療用回転ガントリーに比べ、重量・サイズ共に半分以下となる大幅な小型・軽量化を実現している。

回転ガントリーに搭載される超伝導電磁石は回転させる必要があることから、冷却には 4 K、1.5 W の GM 冷凍機をガントリー全体で合計 34 台用いた伝導冷却方式を採用している。

現在、更に小型化された超伝導回転ガントリーが開発され[44]、山形大学や、台湾の台北榮民総病院に建設中の重粒子線がん治療装置に導入されるべく、製作が進められている。

4.3.2. シンクロトロンの超伝導化

既存の全ての重粒子線がん治療装置は、主加速器として直径 20 m 程度のシンクロトロン加速器を採用していることから、このサイズとコストの低減は、最も重要な課題である。シンクロトロン加速器の電磁石を超伝導化することで、従来、1.5 T 程度に留まっている磁場を 4 T 程度まで増加させ、加速器のサイズを大幅に小型化すること

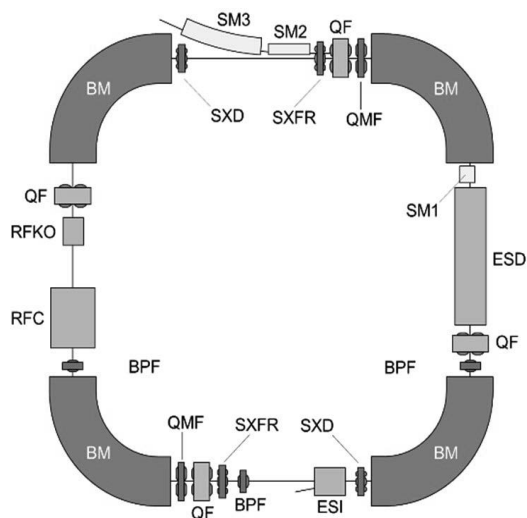


Fig.14 超伝導シンクロトロン加速器の概略図

が可能となる[45]。Figure 14には、超伝導電磁石を使用したシンクロトロン加速器のレイアウトが示されているが、平均直径はおおよそ7 mまで低減されており、従来の約1/3（面積では約1/10）程度まで小型化が可能となる[46]。現在、放医研では、このような加速器の実現に向けて精力的に開発が進められている。

4.4. サイクロトロンの超伝導化

サイクロトロンの小型化を目的にコイルを超伝導化して高磁場を発生させる技術開発は1970年代に米国ミシガン州立大学(MSU)とカナダのChalk Riverで始まり、1980年代後半に実用化されている。第一世代の代表的な超伝導サイクロトロンであるChalk-Riverのサイクロトロン(K=520)のコイルはNbTiのパンケーキ巻で、最大磁場強度は3.8 Tである[47][48]。また、MSUではK1200のサイクロトロン(重量280 t、蓄積エネルギー60 MJ、最大磁場強度5 T、外径4.4 m)が建設され、1988年に運転が開始されている[49]。

これらのサイクロトロンは原子核実験用として陽子あるいは重陽子から重イオンまでを加速するように設計されたが、一方で医療応用としてテーブルトップ型の低エネルギーサイクロトロンの開発もこの時期に始まっている。

MSUで開発された、中性子がん治療用の重陽子サイクロトロン(ビームエネルギー50 MeV、最大磁場5.5 T)は、回転ガントリーに組み込むために超伝導による軽量化を図った[50]。また、PET用同位体生産用にも12-12.5 MeVの陽子サイクロトロンがOxford InstrumentsやIonetix社によって開発されている[51][52]。

2013年にはIBA社が陽子線がん治療装置として直径2.5 mで中心磁場5.7 Tの超伝導シンクロサイクロトロンを開発した[53]。また、Nb₃Snを使って9 Tという高磁場を発生させる超伝導シンクロサイクロトロンMevion S250もMevion Medical Systemsにより開発されている[54]。このマシンは、回転ガントリーに組み込まれており、極めてコンパクトな陽子線治療施設を実現している。

また、日本においても理化学研究所の仁科加速器科学センターで、世界最大の超伝導リングサイクロトロン(K=2600、磁場3.8 T、重量8300 t)が稼働している[55]。

4.5. イオン源の超伝導化

加速器の大強度化など性能の高度化に伴いイオン源は、より高い電荷数、高強度のイオンビームが要求されている。高い電荷数で高強度のイオンビームが得られるイオン源として電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance; ECR)を利用したECRイオン源(ECRIS)が開発されてきた。ECRISで高電荷数、高強度のイオンビームを発生させるためには、高い磁場強度を使ったプラズマ閉じ込め磁場が必要で、そのためのソレノイドコイルに超伝導コイルが使われるようになった。使用するマイクロ波が28 GHzの場合、ビーム軸方向磁場強度の最大値としては4 T程度が必要である。また、6極磁場も必要となるが、それも超伝導電磁石が使われている[56]。またECRイオン源の高性能化には、高磁場、高周波数が必要になる。例えば、45 GHzで最大垂直方向磁場が6.5 T、6極磁場はプラズマチェンバー壁で最大3.3 Tとなる[57]。これまでに開発された主なイオン源について以下にまとめる。

米国ローレンス・バークレイ国立研究所で開発された超伝導ECRIS "VENUS"は、88インチサイクロトロンのイオン源として2006年から使われている[58]。NbTiワイヤーで巻かれたソレノイドコイルと6極コイルが4.2 K液体ヘリウムベッセルの中に置かれている。ビーム軸方向の最大磁場強度は4 Tで、半径方向磁場のチェンバー壁での最大値は2.1 Tである。マイクロ波は28 GHz + 18 GHzが加熱用として用いられており、2011年には450 eμAのU³³⁺、400 eμAのU³⁴⁺が取り出されている。

SuSIは、国立超伝導サイクロトロン研究所/ミシガン州立大学(NSCL/MSU)で設計製作された。ビーム軸方向磁場はミラー磁場強度やミラー距離、最小磁場強度や位置、両ECR点での磁場勾配や磁場分布を変えられるように設計された。軸方向最大磁場強度は3.4 Tで最大半径方向磁場は直径10.1 cmのプラズマチェンバー壁で2 Tであ

る。また、マイクロ波周波数は 18 GHz である。196 μA の U^{33+} を取出している[59]。

理研で開発された RIKEN SC-ECRIS は、ミラー磁場最大値が入り口で 3.8 T、取出し側で 2.2 T の超伝導 ECRIS である。半径方向磁場強度は直径 15 cm のプラズマチェンバー壁で 2.1 T である。マイクロ波は 28 GHz/10 kW である。2 台の GM-JT 冷凍機と 1 台の GM 4.2 K 冷凍機が取り付けられており、ホットプラズマから放射される制動放射による 8 W の熱負荷に対応している。230 μA の U^{33+} と 180 μA の U^{35+} を取出している[60]。

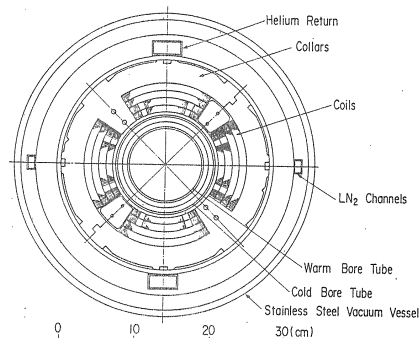
5. 電子加速器

電子加速器においては、電子が非常に軽く強い磁場で曲げると放射光によってエネルギーを失うため、一般的には、磁石の高磁場化はそこまで求められない。ただし放射光源など積極的に工事場を利用して放射光を得る場合や衝突型加速器の衝突点などで狭い空間に極力コンパクトな磁石で磁場を発生させたいなどいくつかの特殊なケースでは超伝導電磁石が利用されている。本章では、応用例として KEK での電子・陽電子衝突型加速器での応用例及び放射光施設での応用例について紹介する。

5.1. 電子・陽電子衝突型加速器

KEK のつくばキャンパスでは、1980 年代に建設された陽子・陽電子衝突型加速器 TRISTAN (Transposable Ring Intersecting Storage Accelerator in Nippon) に始まって、同じ加速器トンネルを利用した KEKB 及び SuperKEKB と 3 つの大きな電子・陽電子衝突型加速器が建設され運転された。これらの加速器の衝突点近傍でビームをしぼって実験の統計を上げるという重要な役目を担ったのが QCS と呼ばれる 4 極磁石である。Figure 15a に TRISTAN の QCS、Figure 15b に KEKB の QCS の断面を示す。どちらも空芯で極力薄く作られていて、実験室の検出器群の中に潜り込む様に設置された。これによって衝突点に極力近い場所

a) TRISTAN QCS (70T/m, 4.5K)



b) KEK-B QCS (22T/m, 4.5K)

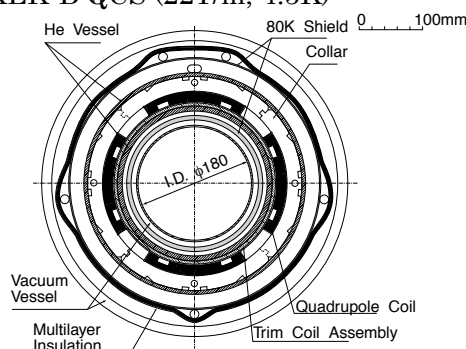


Fig.15 KEK-TRISTAN と KEK-B の QCS

に強力な集束力を生じさせることによってビームを極限まで絞り込んだ[61][62]。

SuperKEKB は、KEKB の 40 倍のルミノシティを目指して KEKB をアップグレードして作られた加速器で、衝突点の QCS は超伝導 4 極電磁石 8 台、補正用超伝導電磁石 43 台そして 4 台の超伝導ソレノイドが狭い衝突点クライオスタットの中に設置された非常に複雑なシステムが構築された[63]。

5.2. 放射光施設

1947 年 General Electric 社の 70 MeV シンクロトロン電子加速器で、電磁波としての放射光が世界で初めて実験的に観測された[64]。この時観測された電磁波は特性波長が 480 nm の紫外線であった。この加速された荷電粒子からの電磁放射の理論的裏付けは、実験的観測の 2 年後の 1949 年に、後にノーベル物理学賞を受賞する理論物理学者 Schwinger により放射光スペクトル及び角

度広がりなどの計算とともに示された[65]。1956年コーネル大学のシンクロトロン加速器を使って、この放射光が、実は物質構造のミクロな世界を見る放射光プローブとして活用できると実証された[66]。

これ以降、これまで高エネルギー実験加速器に付随して様々な利用制限がある中で放射光利用がなされてきた状況から、放射光専用の電子蓄積リングが必要であるとの新しい潮流が生まれることになった。元となる加速器技術は高エネルギー物理実験での加速器技術の転用が可能であるため、その後飛躍的に放射光専用加速器、つまり放射光源加速器の発展と普及が進むことになる。

ここでは、放射光加速器における超伝導電磁石利用に関していくつかの例に分けて簡単に紹介していく。

5.2.1. 超伝導偏向電磁石

偏向電磁石は原理的な放射光生成装置であり、電子ビームを急峻に偏向することでその偏向角に基づきより高いエネルギーの X 線を生成することができる。このため、強磁場の強い曲げ角で電子ビームを偏向できる超伝導偏向電磁石は、電子ビーム自体のエネルギーが低くとも硬 X 線を生成することができる装置として有用である。常伝導電磁石では 1.5 T 程度、永久磁石では 2.0 T 程度の磁場強度に対して、超伝導電磁石では 2.0 T 以上の磁場強度を実現できる。磁石を小型化でき、周長の短い小型リングでも設置が容易である。実際に、アメリカの放射光施設 ALS では超伝導偏向電磁石 (5.0 T) をいち早く蓄積リングに導入し[67]、日本では AichiSR で超伝導偏向電磁石 (5.1 T) を放射光生成装置として主体とする放射光源加速器の運転に世界で初めて成功している[68]。シンガポールでは HELIOS2 にて 4.5 T 超伝導偏向電磁石を用い低い 700 MeV の電子ビームエネルギーながらも 10 keV 以上の硬 X 線の取り出しが可能である[69]。以上のことから、超伝導偏向電磁石は有用性が高い技術であるが、近年要求が増えている極低エミッタンス化をめざす次世代放射光光源では、「緩やかに」「多数の」

偏向磁石で偏向角を実現することが求められているため、超伝導偏向電磁石利用は必ずしも必須ではない。

5.2.2. 挿入光源の超伝導化

挿入光源には正極・逆極のポールを交互に数極並べたウィグラーと 20~30 mm 角の 1.2 T 程度の永久磁石 (ネオジム、サマリウムコバルト) を多数直線上に N 極・S 極交互に並べたアンジュレーターがある。ウィグラーでは強い磁場によりエネルギーの高い光が生成されることに重点が置かれるのに対し、アンジュレーターでは各極からの光の重ね合わせによる高輝度化が期待される。このため、ウィグラーでは、早い段階から超伝導電磁石による高磁場化が図られ、最初の超伝導ウィグラーはロシアの Budker Institute of Nuclear Physics (BINP) で 3.5 T で 20 極のウィグラーが 1979 年に完成している。その後多くの超伝導ウィグラーやアンジュレーターが世界中で製作されている。2000 年には BINP と理研が共同で 10 T の 3 極超伝導ウィグラーが開発され、Spring-8 で実際に使用されている[70]。

アンジュレーターにおいては、エネルギーの高いスペクトル光を得るためには、磁石列の間隔を狭めることが重要だが、一方でそれによる磁場の相殺による磁場中心強度の低下を補うことも必要となる。磁場強度の補正は、磁極間ギャップを狭める方法と磁石本体の磁場強度を上げる方法とがある。ギャップを狭め磁場強度を上げる方法は、簡単だが電子ビームからの放射線損傷やビームの不安定性が起きやすくなるなどの問題がある。磁石本体の磁場強度を上げる手法としては、永久磁石を液体窒素温度 (150 K) まで冷却し保磁力を 1.5 倍に向上させるクライオアンジュレーター[71]、超伝導電磁石を用いた超伝導アンジュレーター[72]とがある。

超伝導アンジュレーターは、電子ビームからの入熱、放射線からの入熱などの課題があるものの、磁場は永久磁石よりも圧倒的に高いものが実現可能なため期待されている技術である。一方、現状の課題として、磁極の周期長の短周期化があ

り、そのためには巻線技術の微細化などの技術開発が必須な状況にある。現在、巻線技術の改善、超伝導材料の高度化 (NbTi 線から、高温超伝導バルク材 REBaCuO、電流密度の高い Nb₃Sn 線) などの微細化に向けた開発が進んでいる。

5.2.3. 収束系磁石の超伝導化

加速器リングは電子ビームを偏向する磁石とビームサイズ・エミッタンスを制御する収束系磁石で構成されるが、電子ビームサイズを小さく絞るためには強収束な磁石が必要となる。特に、極低エミッタンスをめざす次世代放射光光源では、より高度にビームサイズ・エミッタンスを制御するために磁石数が増加し、限られた周長の狭い空間に多数の磁石を配置する必要がある。

これらの要求を満たす為の一つの解として収束系磁石の超伝導化による強収束化が考えられる。特に超伝導電磁石を使った場合磁石本体での磁場強度の制限が大きく上がるために磁石口径を大きく取ったまま強収束化することが可能になり、さらにより短い磁石で必要な収束力を得られるようになる。

5.2.4. 産業用小型放射光施設

半導体集積回路の高密度化は、ムーアの法則と呼ばれる経験則から 18 か月で 2 倍の容量のメモリチップが登場してきた。その法則から、1980 年代にはそれまでの光を使ったリソグラフィでは限界があると考え X 線を用いたリソグラフィ技術の研究が行われるようになった。その X 線発生源として有力視されたのは、超伝導 2 極電磁石を使った小型の SR (Synchrotron Radiation) リングであった。

SR リングのタイプとしては、最も小型化できる円形軌道、超伝導電磁石 2 台を使ったレーストラック軌道、超伝導電磁石 4 台を使った 4 角形が開発されたが、殆どがレーストラック形であった。Table 2 に主な超伝導小型 SR リングのパラメータを示す[73]。これらの装置は X 線リソグラフィによる半導体集積回路の作製の実用研究に供されていた。X 線リソグラフィは、当時の半

導体製造には、別の技術が優勢となってしまったためこれらの超伝導小型 SR 装置は産業用には普及しなかった。しかしながら、近年の集積回路の細密化に伴って加速器を使った EUV (Extra Ultra Violet) リソグラフィが注目されるようになり、それをコンパクトな加速器で実現するために前述の超伝導アンジュレーターを使った小型 SR 装置の実現が期待されるようになってきている。

Table 2 超伝導小型 SR 装置

装置名	E [MeV]	B [T]	Size [m]	BM 数	bore	core
AURORA	650	4.34	0.5	1	warm	Iron
COSY	550	4.47	0.44	2	cold	Air
HELIOS	700	4.5	0.52	2	cold	Air
MELCO	600	3.5	0.59	2	cold	Iron
NIJI III	615	4.1	0.5	4	cold	Air
SuperALIS	600	3.0	0.66	2	warm	iron

6. まとめ

本稿では、超伝導電磁石の加速器応用に関してその歴史と応用例について広く浅く解説してきた。本稿で述べたように、加速器は超伝導電磁石応用の先鞭をつけその後、常に超伝導電磁石応用の大きな柱として機能してきた。また応用が広がるにつれて、加速器応用における超伝導電磁石技術の幅も広がりを持つようになり、MRI など他分野での超伝導電磁石技術とのシナジーも生まれてきている。OHO'22 では、このような加速器分野における各種応用に関してそれぞれの講師が詳細に述べているので是非とも参照されたい。

参考文献

- [1] <https://www.fnal.gov/pub/tevatron/tevatron-accelerator.html>
- [2] https://www.desy.de/research/facilities__projects/hera/index_eng.html
- [3] <http://www.bnl.gov/rhic/>
- [4] <https://home.web.cern.ch/science/accelerators/large-hadron-collider>

- [5] 荻津透「加速器用超伝導電磁石」、OHO テキスト IV, 2011 年, 6. <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOTxt4.html>
- [6] 荻津透他:「超伝導化に向かう円形加速器」ISSN-091909195、電気学会技術報告書、1461、1-60
- [7] 日本加速器学会:「加速器と超伝導技術」、加速器学会誌, 16 巻 4 号 (2020)
- [8] 神谷幸秀「加速器の原理 シンクロトロン及びビストレージリング」、OHO テキスト I, 1984 年, 2. <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOTxt1.html>
- [9] 高田耕治「シンクロトロンと蓄積リングの基礎」、OHO テキスト III, 2009 年, 1. <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOTxt3.html>
- [10] Kamerlingh Onnes, H., "The Superconductivity of Mercury." *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*; Nos. 122 and 124, 1911.
- [11] Meissner W and Ochsenfeld R 1933*Naturw.***21** 787
- [12] Ginzburg V L and Landau L D 1950*Zh. Eksp. Teor. Fiz.***20** 1064
- [13] London F and London H 1935*Proc. R. Soc. A***149** 71
- [14] J. Bardeen, L. Cooper and J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.* 108 (1957) 1175.
- [15] Abrikosov A A 1957*Zh. Eksp. Teor. Fiz.***32** 1442
- [16] 松下照男、磁束ピンニングと電磁現象—超伝導工学の基礎、産業図書、1994 年、ISBN-13: 978-4782857519
- [17] M.N.Wilson, "Superconducting Magnets," Oxford Univ. Press, 1983
- [18] Alvin Tollestrup, Ezio Todesco: "The Development of Superconducting Magnets for Use in Particle Accelerators: From the Tevatron to the LHC," *Reviews of Accelerator Science and Technology*, Vol. 01, No. 01, pp.185-210 (2008)
- [19] H. Edwards: "The TeV Atron Energy Doubler: A Superconducting Accelerator," *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1985.35, pp. 605-660 (1985)
- [20] M.J. Sphers: "Coil Creep and Skew-Quadrupole Field Components in the Tevatron," 2012 IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab srl (2012)
- [21] Michael G. Geynisman, et al.: "Cryogenic System for the Tevatron," Presented at the NIFS Symposium 96, Toki City, Japan (1996)
- [22] R. Meinke, "Superconducting magnet system for HERA," *IEEE Trans. Magn.* 27, 1728 (1991)
- [23] 近藤敬比古:「SSC 計画の経緯と中止について」
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/038-1/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2015/01/16/135442_2_1.pdf (2015)
- [24] A. Devred, T. Ogitsu: "Ramp-Rate Sensitivity of SSC Dipole Magnet Prototypes," *低温工学*, Vol. 29, No. 9, pp.424-452 (1994)
- [25] M. D. Anerella, D. H. Fisher, E. Sheedy, T. McGuire: "Industrial Production of RHIC Magnets," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, No. 4, pp.2059-2064 (1996)
- [26] L. Rossi: "State-of-the Art Superconducting Magnets", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.12, No.1, pp.219-227 (2002)
- [27] Y. Ajima et al. : "The MQXA quadrupoles for the LHC low-beta insertions", *Nucl. Instr. and Meth. A* 550 pp.499-513 (2005)
- [28] P. Ferracin, et.al.; "The HL-LHC Low- β Quadrupole Magnet MQXF: from Short Models to Long Prototypes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.29, No.5, 4001309 (2019)
- [29] 中本建志:「LHC 高輝度化アップグレード計画」, *低温工学*, Vol. 52, No. 2, pp.141-148 (2017)
- [30] T. Nakamoto, et al., "Construction of Superconducting Magnet System for the Neutrino Beam Line", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.20, No.3, pp.208 (2010)
- [31] K. Sasaki, et al., "Commissioning Results of Superconducting Magnet System for the Neutrino Beam Line", *IEEE Trans. On Appl. Supercond.* vol. 20, no. 3 (2010) pp 242 - 245.
- [32] 荻津透他、「J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石システム」*日本加速器学会誌*, 6(4) pp.335-345, 2009
- [33] Y. Makida, et.al. "Performance of a Superconducting Magnet System Operated in the Super Omega Muon Beam Line at J-PARC," *AIP conf. proc.*, 1573, 438 (2014)
- [34] T. Semba, et.al. "Design and Manufacture of a Superconducting Solenoid for D-Line of J-PARC Muon Facility," *Proc. 7th Int. Part. Accel. Conf. (IPAC2016)* 1177-1179 (2016)
- [35] M. Yoshida, et.al. "Status of Superconducting Solenoid System for COMET Phase-I Experiment at J-PARC," *IEEE Trans. On Appl. Supercond.* vol. 25, no. 3 (2015) 4500904.

- [36] 三部勉他、「ミューオン g-2/EDM 実験」
<http://www.jahep.org/hepnews/2012/12-3-5-g-2-Mibe.pdf>
- [37] H. Yamaguchi, *et al.* “Development of a CW-NMR Probe for Precise Measurement of Absolute Magnetic Field,” *IEEE Trans. On Appl. Supercond.* vol. 29, no. 5 (2019) 895360.
- [38] 杉田圭、「ドイツ・重イオン研究所 GSI と国際協力加速器プロジェクト FAIR」 「加速器」 Vol. 10, No. 4, 2013(246 -249)
- [39] K. Sugita, *et al.*: “Study on magnetic field deviation due to manufacturing errors of the SIS100 superconducting dipole magnet ” , *Cryogenics*, 80, pp.385 (2016)
- [40] S. Farinon, *et al.*, A Model Dipole for FAIR SIS300: Design of the Mechanical Structure”, *IEEE Trans. On Appl. Supercond.* vol. 19, no. 3 (2009) pp 1141 - 1145.
- [41] H. Eickhoff: “Tests of a Light-ion Gantry Section as an Example of Preparations for the Therapy Facility in Heidelberg,” *Proceedings of the 8th European Particle Accelerator Conference, Paris, EPS-IGA and CERN, Geneva*, pp.2730-2732 (2002)
- [42] Y. Iwata, K. Noda, T. Shirai, T. Murakami, T. Furukawa, S. Mori, T. Fujita, A. Itano, K. Shouda, K. Mizushima, T. Fujimoto, T. Ogitsu, T. Obana, N. Amemiya, T. Orikasa, S. Takami, S. Takayama, and I. Watanabe: “Design of a superconducting rotating gantry for heavy-ion therapy,” *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 15, 044701 (2012)
- [43] Y. Iwata *et al.*: “Beam commissioning of a superconducting rotating-gantry for carbon-ion radiotherapy,” *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A* 834, pp.71-80 (2016)
- [44] 高山茂貴・折笠朝文・長本義史・吉行健: 「次世代回転ガントリー用超電導電磁石の磁場設計」, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディング, pp. 1235-1237 (2017)
- [45] 高山茂貴, 折笠朝文, 吉行健, 平田寛, 岩田佳之, 水島康太: 「重粒子線治療装置のためのシンクロトロン用超電導電磁石の開発」, 第 15 回日本加速器学会年会プロシーディング, pp. 1223-1225 (2018)
- [46] 水島康太・白井敏之・岩田佳之・古川卓司・野田耕司: 「重粒子線治療用超伝導シンクロトロンの設計」, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディング, pp.1243-1245 (2018)
- [47] H. Schmeing: “Current Status of the Superconducting Cyclotron at Chalk River,” *Proceedings of the 12th international conference on cyclotrons and their applications*, p.88 (1989)
- [48] C. Bruce BIGHAM, *et al.*: “First Operation of the Chalk River Superconducting Cyclotron,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A254, pp.237-251 (1987)
- [49] J. A. Nolen, *et al.*: “Commissioning Experience with the NSCL K1200 Superconducting Cyclotron,” *Proceedings of the 12th international conference on cyclotrons and their applications*, p.5 (1989)
- [50] H. G. Blosser: “Applications of Superconducting Cyclotrons,” *Proceedings of the 12th international conference on cyclotrons and their applications*, p.137 (1989)
- [51] J. Vincent: “The Ionetix Ion-12SC Compact Superconducting Cyclotron for Production of Medical Isotopes,” *Proceedings of Cyclotrons2016*, p.290 (2016)
- [52] . Smirnov, S. Vorozhtsov, and J. Vincent: “Design Study of an Ultra-compact Superconducting Cyclotron for Isotope Production,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A763, pp. 6-12 (2014)
- [53] W. Kleeven, *et al.*: “The IBA Superconducting Synchrocyclotron Project S2C2,” *Proceedings of Cyclotrons 2013*, p.115 (2013)
- [54] Th. Haberer, *et al.*: “Novel Techniques and Challenges in Hadron Therapy,” *Proceedings of IPAC2013*, p.3112 (2013)
- [55] A. Goto, *et al.*, “Sector Magnets for the RIKEN Superconducting Ring Cyclotron”, *IEEE Trans. On Appl. Supercond.* vol. 14, no. 2 (2004) pp 300 - 305.
- [56] G. Ciavola, *et al.*: “A New Superconducting ECR Ion Source for the Future Accelerator Facilities,” *Proceedings of EPAC2002*, p.1706 (2002)
- [57] D. Z. Xie, *et al.*: “Possible Optimizations of Existing Magnet Structures for the Next Generation of ECRIS,” *Proceedings of ECRIS2016*, p.5 (2016)
- [58] D. Leitner, *et al.*: “Status Report and Recent Developments with VENUS,” *Proceedings of ECRIS2008*, p.2 (2008)
- [59] L. Sun: “High Intensity Operation for Heavy Ion Cyclotron of Highly Charge ECR Ion Source,” *Proceedings of Cychotrons2013*, p.125 (2013)
- [60] Y. Higurashi, *et al.*: “Recent Developments of RIKEN 28 GHz SC-ECRIS,” DOI: 10.18429/JACoW-ECRIS2016-MOBO04

- [61] K. Tsuchiya, K. Egawa, K. Endo, K. Kabe, Ta. Kubo, Y. Morita, Y. Ohsawa, N. Ohuchi, T. Ozaki, R. Sugahara and Y. Kimura, 'Superconducting Magnet -System for the TRISTAN Low-Beta Insertion,' Proc. 2nd EPAC, Nice, France, 1990, pp.1529-31.
- [62] K. Tsuchiya *et al.*, "Superconducting magnets for the Interaction Region of KEKB," IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 9, No. 2 (1999), p.1045.
- [63] N. Ohuchi, et al.: "SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system," Nucl. Instr. and Meth. A 1021 1 165930 (2022)
- [64] F.R. Elder: "Radiation from Electrons in a Synchrotron," Phys Rev, Vol. 71, pp. 829 (1947)
- [65] J. Schwinger: "On the Classical Radiation of Accelerator Electrons," Phys Rev, Vol.75, pp. 1912-1925 (1949)
- [66] D.H. Tomboulia and P.L. Hartman: "Spectral and Angular Distribution of Ultraviolet Radiation from the 300 MeV Cornell Synchrotron," Phys. Rev, Vol. 102, pp. 1423 (1956)
- [67] D. Robin: "Superbend Upgrade on the Advanced Light Source," NIM in Physics Research Section A, Vol. 538, Issues 1-3, pp. 65-92 (2005)
- [68] 保坂将人: 「あいち SR 超伝導偏向電磁石の現状」, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 461, (2013)
- [69] HO Moser: "Status and Planned Development of the Singapore Synchrotron Light Source," Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, p. 32 (2001)
- [70] K. Soutome, *et al.*: "Generation of high-energy synchrotron radiation with a 10-T superconducting wiggler installed in the SPring-8 storage ring," DOI: 10.1109/PAC.2003.1288893
- [71] 原徹: 「クライオアンジュレーターの開発」, 放射光, Vol. 18, No. 6, pp. 356-362 (2005)
- [72] N. Mezentsev: "Superconducting Wiggles and Undulators," Presentation transcript of Joint seminar of John Adams Institute for Accelerator Science (JAI) (2016)
- [73] E. Weihrer: "Review of Compact Synchrotron Light Sources," Proceedings of EPAC1992, p.93 (1992)