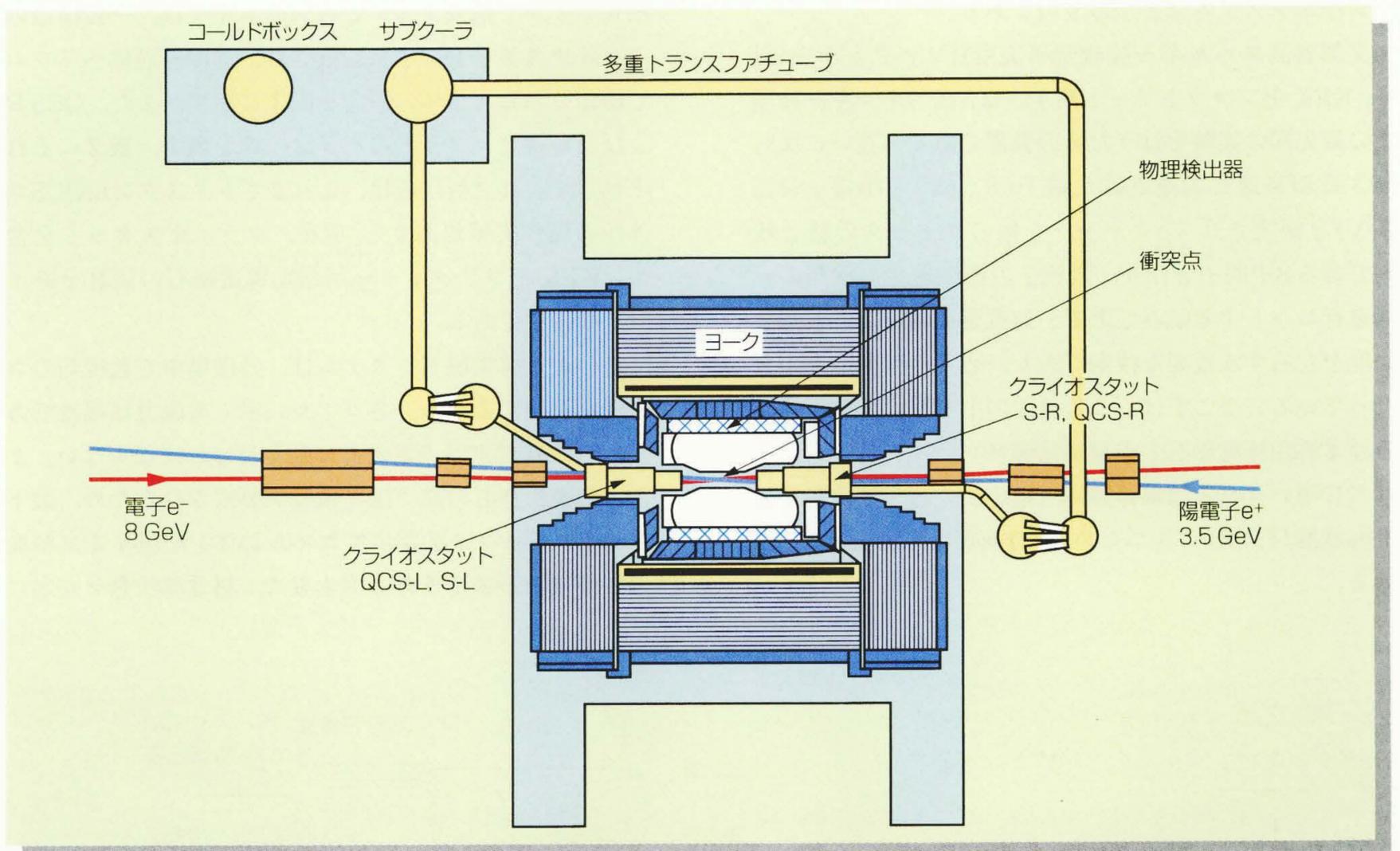


# 超電導技術—高エネルギー物理学研究所Bファクトリー納め 四極超電導電磁石および冷凍機システム—

Superconductivity Application Technologies—Superconducting Quadrupole Magnet and Cooling System for KEK B Factory—

土屋清澄\* Kiyosumi Tsuchiya 桜畠広明\*\*\* Hiroaki Sakurabata 松本孝三\*\*\*\* Kôzô Matsumoto  
山口 潔\*\* Kiyoshi Yamaguchi 清藤雅宏\*\*\*\* Masahiro Seidô



注：略語説明 S-R(右側小型超電導ソレノイド電磁石), S-L(左側小型超電導ソレノイド電磁石), QCS-R(右側超電導四極電磁石)  
QCS-L(左側超電導四極電磁石)

## 文部省高エネルギー物理学研究所のBファクトリー(衝突点付近の機器配置)

8 GeVの電子と3.5 GeVの陽電子を衝突させてB中間子を大量に作り、素粒子の標準理論の検証の一部を行う物理実験を実施する。

現在、文部省高エネルギー物理学研究所ではBファクトリー(KEK B)の建設が進んでいる。この設備は、8 GeVの電子と3.5 GeVの陽電子を衝突させてB中間子と反B中間子を大量に作りだし、高精度の素粒子実験を行うもので、8 GeVと3.5 GeVの二つのリングから成る非対称・2リング型の衝突型加速器である。

衝突点には物理実験用の大型検出装置が置かれ、加速器のビームライン上には衝突点における電子、陽電子ビームを極力小さく絞り、衝突効率を上げるための超電導

四極電磁石(衝突点の左右にある)や、物理検出器のソレノイド磁場が加速器ビームに及ぼす影響を打ち消すための小型超電導ソレノイド電磁石(衝突点の左右にある)などが設置される。

このように、高エネルギー物理学の分野では超電導技術は実用化されており、その長期運転実績も蓄積されてきている。今後、これらの技術は、比較的小型の加速器システムにも適用されていくものと思われる。

\*文部省高エネルギー物理学研究所 工学博士 \*\*日立製作所 日立研究所 \*\*\*日立製作所 日立工場 \*\*\*\*日立電線株式会社 土浦工場 工学博士 \*\*\*\*\*日立製作所 笠戸工場

## 1. はじめに

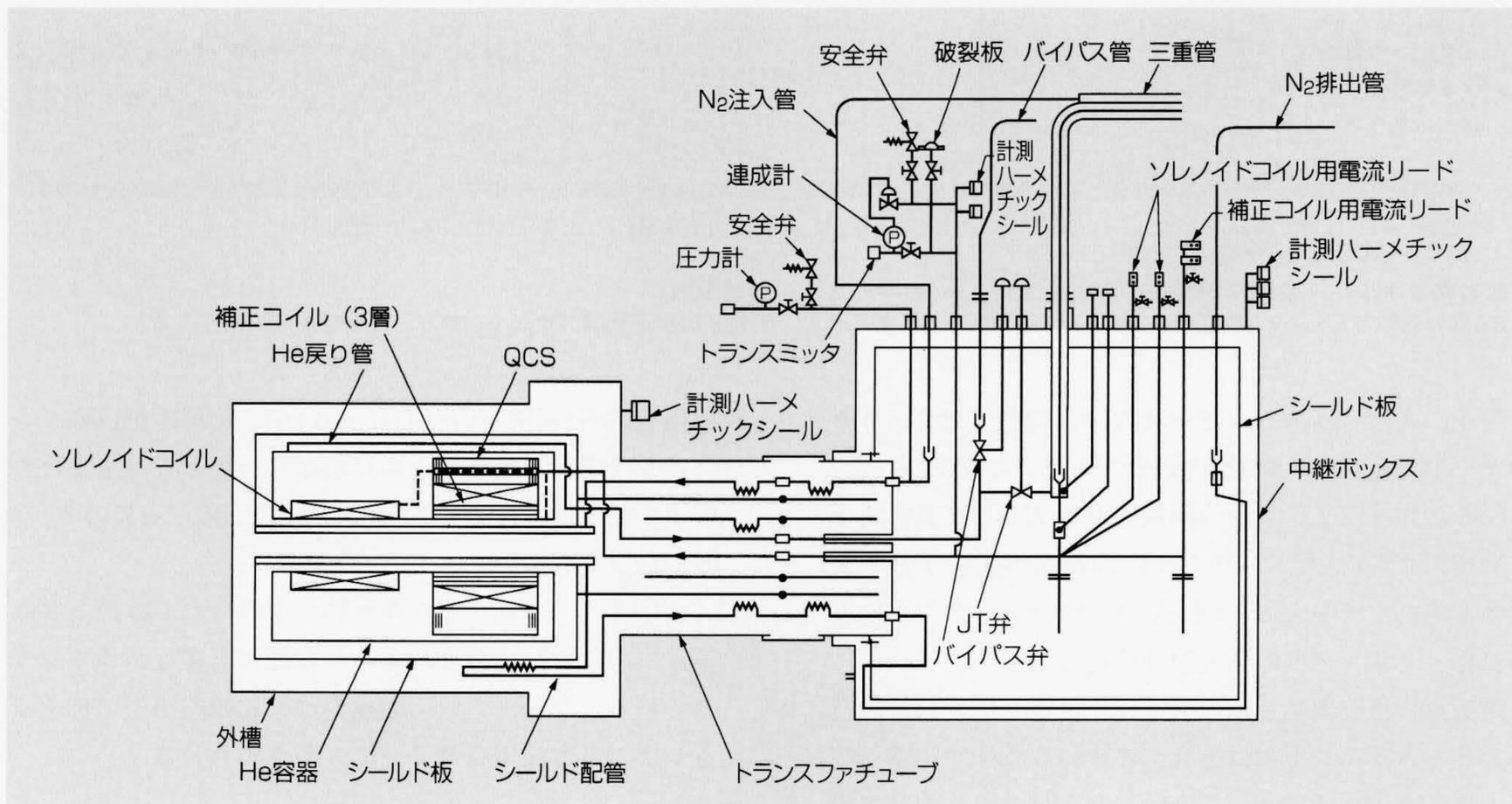
超電導技術は、加速器システムの高エネルギー化やコンパクト化には欠かせないものである。また、エネルギー効率の改善という面も見逃せない。超電導技術の対象としてはビームを曲げる二極磁石、ビームを調整する四極磁石、検出器に用いる大型のソレノイド磁石などがある。さらに、これら超電導磁石を冷却するためにはヘリウム冷却システムは必須のものである。

文部省高エネルギー物理学研究所Bファクトリー(以下、KEK Bファクトリーと略す。)は、高エネルギー物理学の最先端の実験を行うための装置である。互いに反対向きに超高速に加速された電子(8 GeV)と陽電子(3.5 GeV)を衝突させてbクォークと他のクォークの結合状態であるB中間子を作り、素粒子の標準理論の検証の一部を行おうとする試みである。超電導技術はこの装置の性能を左右する重要な技術であり、必要不可欠のものとなっている。ここでは、この装置の中で特に衝突点両側の超電導四極電磁石と小型超電導ソレノイド電磁石、それらに用いられる超電導導体、およびこれら電磁石を超電導状態(4.4 K)に保つための冷却システムについて述べる。

## 2. 高エネルギー化には必須の超電導電磁石

KEK Bファクトリーの衝突点に設置される超電導電磁石は、電子と陽電子のエネルギーが違うために衝突点を挟んで左右非対称である。これらは、ビームライン上の1.5 Tの磁場を打ち消す小型超電導ソレノイドコイル、それに隣接する鉄ヨークを持たない超電導四極電磁石(QCS)、およびQCSの内側に設置した3種類の超電導補正コイルで構成する。これらのコイルは、一体構造のクライオスタットの中に設置され、過冷却液体ヘリウムで冷却される。全体の概念を図1に示す。また、QCSおよび超電導ソレノイドのパラメータを表1、表2にそれぞれ示す。日立製作所は、これまでトリスタン用QCSコイルの製作実績があり、現在、クライオスタットを含め、KEK Bファクトリー用超電導電磁石の設計を終了して製作中である。

この超電導電磁石システムは、外磁場中で数種類のコイルを励磁するため、各コイルに働く電磁力は複雑であり、最大51,800 Nの電磁力に耐えなければならない。また、加速器特有の高い磁場精度が要求されるため、数十マイクロメートルの精度でコイル導体を配置する高精度の製作技術が必要である。さらに、超電導状態を安定に



注：略語説明ほか QCS(四極電磁石), JT弁(ジュールトムソン弁), (自動弁), (手動弁)

図1 クライオスタットの概略フロー

QCS, ソレノイドコイルおよび補正コイルが入るクライオスタットと、それらに冷媒を供給するシステムの概略フローを示す。

表1 超電導四極電磁石(QCS)の主要パラメータ

QCSの仕様のうちの磁石として求められる性能や大きさなどの主要パラメータを示す。

項目	右側QCS	左側QCS
磁場こう配	21.26 T/m	21.26 T/m
通電電流	2,962 A	2,962 A
有効長	0.385 m	0.483 m
最大経験磁場	4.3 T	4.3 T
蓄積エネルギー	73.4 kJ	92.1 kJ
インダクタンス	16.7 mH	21.0 mH
コイル	直線部長さ	201 mm
	内径	φ260 mm
	外径	φ289.8 mm
	巻数	106

保つために冷却による緩みを防ぎ、また電磁力による超電導線の動きを防ぐため、製作時にこれら緩みや電磁力相当の予圧をかけて保持しておく必要がある。このような要求に対して、三次元の電磁場解析および応力解析などを行って電磁石の構造を決定するとともに、製作法にも十分な検討を加えた。

また各超電導電磁石は、極低温(4.4 K)に保持するために、円筒形のヘリウム容器、輻(ふく)射シールド、断熱真空容器などから成るクライオスタット内に収納する。このクライオスタットは、超電導電磁石と1.5 Tの外磁場との相互作用による軸方向最大電磁力25,000 Nに対しても十分な剛性を持つとともに、超電導電磁石を0.2 mm以下の高精度で据え付ける。

### 3. 加速器に適した超電導線材

先に示した衝突点に設置される超電導電磁石には、それぞれ異なった構造のNbTi/Cu系の超電導導体を使用される。

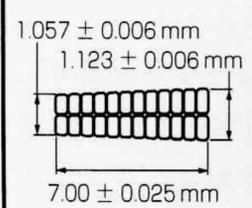
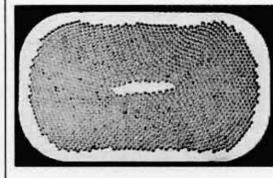
表2 超電導ソレノイドの主要パラメータ

ソレノイドの仕様のうちの磁石として求められる性能や大きさなどの主要パラメータを示す。

項目	右側ソレノイド	左側ソレノイド
中心磁場	5.43 T	4.48 T
通電電流	567 A	486 A
最大経験磁場	5.42 T	4.51 T
蓄積エネルギー	231 kJ	117 kJ
インダクタンス	1.44 H	0.99 H
コイル	長さ	650 mm
	内径	φ190 mm
	外径	φ222 mm
	巻数	5,200(325×16)

表3 超電導導体の諸元

QCS用導体は成形より線構造であり、小型ソレノイド用導体は耐放射性的エナメル被覆を施したモノリス線である。

項目	QCS	小型ソレノイド	
素線	材質	NbTi/Cu	NbTi/Cu
	素線サイズ	φ0.59 mm	1.1×1.9(mm)
	銅比	1.8	1.0
	フィラメント径	6.3 μm	28 μm
	スペーシング	>1.5 μm	—
	表面処理	ステブライト処理(Sn-Agめっき)	—
導体種	ラザフォードタイプ成形より線	モノリス	
導体	導体寸法	(1.057—1.123)×7 mm (キーストタイプ)	—
	素線数	24本	—
	残留抵抗比	≥150	≥150
	臨界電流(4.2 K)	≥4,460 A@ 6 T ≥3,430 A@ 7 T	≥1,400 A@ 6 T ≥1,100 A@ 7 T
絶縁	カプトンテープハーフラップ巻	耐放射性的エナメル被覆	
断面形状			

KEK Bファクトリー用のQCSおよび小型ソレノイドの超電導導体の諸元を表3に示す。QCS用導体としては、そのくさび状のキーストーン型成形より線導体が適用でき、トリスタンQCS導体と類似の断面導体の超電導導体が用いられる。

小型ソレノイドとしてはより線ではなく単線タイプの銅安定化NbTi線材を用い、臨界電流に合わせて1.1×1.9(mm)のく形断面導体として使用する。その周囲は耐放射性的エナメル絶縁層を被覆した構造とする。

### 4. 加速器用過冷却液体ヘリウム冷却システム

超電導磁石を4.4 Kまで冷却し、その温度を保持するための過冷却液体ヘリウムを供給する冷却システムについて述べる。

加速器用超電導機器の冷却方式としては液体ヘリウムに直接浸す直接冷却(超電導加速空洞SCC用<sup>2)</sup>)、気液二相流による強制冷却、過冷却液体ヘリウムによる強制冷却(QCS用<sup>3)</sup>)などがあり、冷凍能力では300 Wクラスから6,500 Wクラスまでの製作実績がある。

KEK Bファクトリー用の冷却システムとして、トリ

スタンで建設された4式のQCS用冷却システムのうち、筑波実験室の1式を超電導磁石用に改造し、富士実験室の1式は筑波実験室に移設して粒子検出器用に改造流用する計画である。現在、改造に必要な機器の設計を終えて製作中である。

超電導磁石用冷却システムの概略を89ページの図および図1を参照して説明する。コールドボックスとサブクーラは既設設備の流用である。多重トランスファチューブとクライオスタットの接続は着脱可能なU字管としている。

サブクーラで生成した過冷却液体ヘリウム(4.47 K, 0.16 MPa)は、多重トランスファチューブとU字管を通り、二つのクライオスタットに供給される。電磁石を冷却した過冷却液体ヘリウムは、クライオスタット内のJT弁で0.12 MPaまで膨張して4.42 Kの気液二相流となり、多重トランスファチューブ内の侵入熱を吸収しながらサブクーラに戻る。

システムの冷却負荷などを表4に示す。多重トランスファチューブは、U字管に液体窒素シールドを設けて侵入熱を低減し、高性能化したものである。冷却能力は、1995年7月3日の測定値であり、建設時の性能試験結果(1991年1月)と同様で、能力の低下は見られない。この計画条件は安全率(性能:負荷)で評価し、トリスタンQCSの運転実績内であり、同様の運転性能が得られると考える。

制御システムは、トリスタンQCS用と同様、予冷、加温、異常処理を含めて自動化し、信頼性、制御性、およ

表4 冷却負荷などの仕様

トランスファラインなどの高性能化により、トリスタンQCSと同様な安全率(能力:負荷)を確保している。

項目	内容	冷却負荷など
冷却負荷 電流リード	四極 2,913×2本	14 L/h
	100 A×1本	1 L/h
	ソレノイド 700 A×4本	7 L/h
	補正 100 A×12本	7 L/h
クライオスタット トランスファライン	右側+左側	35 W
	多重管 75 m	20 W
	U字管 63 m×2本	20 W
合計		29 L/h+75 W
冷却能力	既設部 測定値	30 L/h+193 W

び保守性の向上を図る予定である。

## 5. おわりに

ここでは、KEK Bファクトリーで進行中の超電導技術を使ったシステムのうち、超電導コイル、超電導導体、およびヘリウム冷却システムについて述べた。

超電導技術は金属系導体やコイル化技術に長足の進歩があり、一方では冷却技術の進歩に伴って、完全に実用化の域に達している。

さらに、高エネルギー化に向けた開発が行われる一方で、コンパクト化に向けた開発も進んでいる。現在、開発が進められている酸化物超電導体を用いたコイルの出現も十分期待されることから、超電導技術の加速器システムへのいっそうの展開を図っていく考えである。

## 参考文献

- 1) 浅野, 外: 超電導技術の加速器への応用, 日立評論, 71, 7, 613~620(平1-7)
- 2) K. Hosoyama, et al.: Cryogenic System for TRISTAN Superconducting RF Cavities, Fusion Engineering and Design 20(1993)
- 3) K. Tsuchiya, et al.: Helium Cryogenic System for the Superconducting Insertion Quadrupole Magnet of the TRISTAN Storage Ring, Advanced in Cryogenic Engineering, Vol.37 Part A(1992)