U.D.C. (621.592:546.291): (621.318.3:538.945): 621.384.6

# 「トリスタン」超伝導高周波加速空洞用 ヘリウム液化冷凍システム

Cryogenic System for TRISTAN Superconducting RF Cavity

文部省高エネルギー物理学研究所では,超伝導高周波加速空洞を設置するこ とにより電子-陽電子衝突型加速器「トリスタン」のビームエネルギーを増強す る計画が進められている。超伝導高周波加速空洞を超伝導状態に保持するため には,大型のヘリウム冷凍システムが必要となるが,高エネルギー物理学研究 所と日立製作所では,4kW(国内最大容量)のヘリウム冷凍システムを開発し, 完成させた。

本システムは,超臨界膨張タービンを組み込むことによって,6.5 kWまで冷 凍能力を増力でき,さらに高温膨張タービンの設置により,液体窒素予冷を排 除することが可能となるなど,拡張性の高い設計がなされている。また,増力 計画に備えて超臨界膨張タービンの開発を行い,低温回転試験の結果,実機搭 載への見通しを得た。

松本孝三* Kôzô Matsumoto 河村成人** Shigeto Kawamura 森田荘司** Sôshi Morita 原田 進*** Susumu Harada 古谷雅弘**** Masahiro Furutani	細山謙二*	Kenji Hosoyama
河村成人** Shigeto Kawamura 森田荘司** Sôshi Morita 原田 進*** Susumu Harada 古谷雅弘**** Masahiro Furutani	松本孝三*	Kôzô Matsumoto
森田荘司** Sôshi Morita 原田 進*** Susumu Harada 古谷雅弘**** Masahiro Furutani	河村成人**	Shigeto Kawamura
原田 進*** Susumu Harada 古谷雅弘**** Masahiro Furutani	森田荘司**	Sôshi Morita
古谷雅弘**** Masahiro Furutani	原田 進***	Susumu Harada
	古谷雅弘****	Masahiro Furutani

1 緒 言

電子-陽電子衝突型加速器「トリスタン」は1986年の秋に完成し、銅の常伝導高周波加速空洞により電子-陽電子ビームを 25 GeVに加速して、高エネルギー物理実験を開始した<sup>1)</sup>。その 後、高エネルギー物理学研究所では、さらにビームエネルギ ーを上げるため、以前から開発を進めてきた超伝導高周波加 速空洞<sup>2)</sup>(以下、超伝導加速空洞と略す。)を、世界に先駆けて トリスタンメインリングに設置することを決定した。

純ニオブ製の超伝導加速空洞は、5連空洞2台が1台のク ライオスタット内に収納され、内直径700 mmのヘリウム槽で、 約9001の液体ヘリウムにより浸漬冷却されるため、大型のヘ リウム冷凍システムが必要となる(図1参照)。超伝導加速空 洞の設置に当たっては、まず8台のクライオスタット(加速空 洞としては16台)を設置し、その有効性を確認した後に、さら に8台のクライオスタットを追設することになった。また、 冷却用のヘリウム冷凍システムも冷凍能力を暫定的に4kWと し、最大6.5kWまで能力増強が可能な設計として建設計画が スタートした<sup>3)</sup>。

1988年11月,液体ヘリウムに浸された16台の超伝導加速空 洞は、トリスタンのビームエネルギーを30 GeVまで上昇させ 本稿では、ヘリウム冷凍システムの概要と、増力計画用に 開発した超臨界膨張タービンの実験結果について述べる。

## 2 ヘリウム冷凍システムの概要

## 2.1 ヘリウム冷凍システムフロー

システム全体のフローを図2に、鳥観図を図3に示す。へ リウム循環圧縮機、コールドボックスは、地上の建屋に設置 されており、コールドボックスにより生成された液体へリウ ムは、1万2,0001の液体へリウム容器に貯液された液体へリウ ムは、1万2,0001の液体へリウム容器に貯液された液体へリウ クライオスタットによって地下トンネル(地下11m)内の全長 約200mのトリスタン直線部に設置した16台の超伝導加速空洞 クライオスタットに送られ、超伝導加速空洞の冷却に利用さ れる。そこからの蒸発へリウムガスは、トランスファライン によってコールドボックスに戻され、そごで寒冷が回収され た後、ヘリウム循環圧縮機へ戻る。コールドボックスの予冷 やトランスファライン、超伝導加速空洞クライオスタットの 80 K断熱輻(ふく)射シールドに利用する液化窒素は、屋外に 設置した5万1液化窒素貯槽から供給される。なお、80 K断熱 輻射シールド用液化窒素は、液化窒素循環装置によって循環 運転され、液化窒素の顕熱を有効利用するとともに温度制御

59

## ることに成功し、世界で初めてその有効性を示した。

\* 文部省 高エネルギー物理学研究所 理学博士 \*\* 日立製作所 笠戸工場 \*\*\* 日立製作所 機械研究所 \*\*\*\* 日立テクノエンジニアリング株式会社 笠戸事業所 1050 日立評論 VOL. 71 No. 10(1989-10)





図 | 超伝導高周波加速空洞 厚さ約2mmの純ニオブ製の5連の超伝導高周波加速空洞(508 MHz)2台は ヘリウム槽に収納されており、液体ヘリウムによって浸漬冷却される。



図2 ヘリウム冷凍システムフロー図 点線の部分が増強される部分である。

60

「トリスタン」超伝導高周波加速空洞用ヘリウム液化冷凍システム 1051





$\odot$		9 9	五 1/目	埰 圧	州日 17支		Ā	3	×	T	)	κι	Ι <u>Τ</u>	19	H	1752
6	中	圧	\$	ン	ク	(12)	~	IJ	ウ	Ъ	冷	凍	機	制	御	盤

図3 ヘリウム冷凍システム鳥観図 地下IImのトリスタントンネル内に、16台の超伝導加速空洞が配置される。

が容易に行えるようになっている。

## 2.2 基本計画と増力計画

本システムの大きな特徴は、単に冷凍容量が大きいだけで なく、次の点で拡張性を持っている点である。

(1) 基本計画では冷凍能力は4kWであり、2台の膨張タービンを寒冷発生源として用いているが、最低温部ではジュールトムソン弁(以下、JT弁と略す。)での膨張だけである。これに対して増力計画では、冷凍能力6.5kWに対応して、効率よく寒冷を発生させるため、JT弁によるへリウムガスの膨張の一部を超臨界膨張タービンに置き換えている。これにより、寒冷発生源単位は約25%向上する。

(2) 基本計画では、80 Kレベルからの高温の寒冷源として液体窒素を予冷に用いているが、増力計画では、補助コールドボックスに2台の高温膨張タービンを設置して寒冷を発生させる。これにより、通常運転では液体窒素の予冷は不要となる。

(3) 80 Kレベルに,外部と接続可能なポートを設けてあり, ヘリウムガス中の不純物を吸着精製する吸着器が追設可能で (2) 膨張タービンの追設に際しても,熱交換器は基本計画と 増力計画とでは不変であるため,計算機シミュレーションに よって,両者のモードを共に満たすプロセス構成を解析した。

## 3 主要機器の構成と特徴

## 3.1 コールドボックス

コールドボックスは、円筒縦型(φ4m×6m)の断熱真空容 器の内部にアルミプレートフィン式熱交換器、動圧ガス軸受 式膨張タービン、JT弁などを持つクロードサイクル式である。 (1) メンテナンスを容易とするため、上部フランジを支える 構造とし、外槽は下部ピットに落とし込めるようにした。 (2) 現地での施工を最小限とするため、工場で完全に組み上 げる方式とし、内部サポートに縦・横の両方向性を持たせ、 横向きにして輸送し現地で直立させた。

(3) 増力計画に備えて、拡張用のバイオネットタイプの取り付けポートが設置されている。

61

本コールドボックスの外観を図4に示す。

## 3.2 ヘリウム循環圧縮機

ある。	ヘリウム循環圧縮機として,油噴射式スクリュー圧縮機の
なお,上記の拡張性を持たせるために,設計上次の配慮を	単段機を複数台組み合わせる方式を、以下の理由により採用
行った。	した。
(1) 各拡張機能を独立に実施可能とするため、プロセス上80	(1) 従来, ヘリウム用として使用されている一軸二段圧縮の
Kレベルが常に一定になるようにする。	コンパウンドタイプに比較して、単段機ごとに油噴射量を調

1052 日立評論 VOL. 71 No. 10(1989-10)

節できるので、効率改善が容易である。 (2) 高段機は1基にまとめられているので、低段機と同じ くロータ径を製作実績のある中では、最大径とすることが



できる。

本方式により圧縮機本体で、等温効率50%以上を満足した。 3.3 トランスファライン

トリスタン地下トンネルの16台のクライオスタットへ超伝 導加速空洞冷却用の液体ヘリウム,液化窒素を輸送するトラ ンスファラインは、それぞれ往復のラインを持っている。主 要ラインは上記4ラインが同一の真空配管に収納されており、 ヘリウムラインは侵入熱を軽減するように、液化窒素ライン によって80Kに断熱輻射シールドされている。

特徴としては,

(1) トンネル内のビームラインと平行に設置されたヘッダト ランスファ ラインには、各クライオスタットに対応して、16 台のコネクションボックスが配置されている。各コネクショ ンボックスでは、自動制御弁によって、クライオスタットの ヘリウム液位制御や断熱輻射シールド用の液化窒素の流量制 御を行う。

(2) 各クライオスタットの圧力変化を極力抑えるため、ヘッ ダ トランスファ ラインのヘリウム戻りラインは、大口径100 A配管とした。

図4 ヘリウム冷凍機コールドボックス コールドボックス上部 には、膨張タービン、自動弁および拡張用ポートが取り付けられている。 外槽は、地下ピットに下ろせる構造となっている。

トランスファラインの主要部分の構造を図5に、コネクシ ョンボックス部外観を図6に示す。

## 3.4 制御系

分散型制御システム「日立EX-1000」を用い、制御室内CRT コンソールで集中管理を行っている。データハイウエイは, トンネル内直線部に対応して2か所に設置されているマルチ ループコントローラだけでなく、トリスタン コントロール シ ステムとGWU(ゲートウエイユニット)を介して接続されてい





62

### 図 5 トランスファライン ヘリウムライン2本(往路・復路)が液体窒素断熱輻射シールド板の内部に配置されて いる。真空層にはスーパーインシュレータが巻かれ、断熱効果を上げている。

「トリスタン」超伝導高周波加速空洞用ヘリウム液化冷凍システム 1053

## 4.2 超伝導加速空洞の冷却

約3日間かけて超伝導加速空洞を冷却し、クライオスタッ トに液体ヘリウムを貯液する。定常運転中は、超伝導加速空 洞で発生する高周波損失とクライオスタット内ヒータの発熱 量が一定になるように、ヒータ発熱量を制御した。冷凍機か らみて、各クライオスタットの熱負荷が一定となり、クライ オスタット内のヘリウム液位を制御することによって、安定 な運転が実現できた。ヒータと超伝導加速空洞の発熱量の関 係を図8に示す。

## 5 超臨界膨張タービンの開発

JT弁の膨張の一部を外部に対して仕事をする膨張タービン に置き換えることによって、より高効率の冷却が可能となる ため、今後の大型冷凍システムでは超臨界膨張タービンは不 可欠になると考えられている。

超臨界膨張タービンは、極低温(約8K)下で運転されるた め、次の特徴を持っている。

膨張時の理論断熱熱落差が小さい。 (1)

ヘッダ トランスファ ライン

トリスタン ビーム ライン

図6 ヘッダ トランスファ ラインとコネクションボックス コネクションボックスには、液体ヘリウム、液体窒素の流量を制御す る自動弁が設置されている。

る。CRTのグラフィック表示例を図7に示す。

#### 運転結果 4

## 4.1 性能確認試験

超伝導加速空洞の設置に先立ち、 ヘリウム冷凍システムの 冷凍能力確認試験を行った。液体ヘリウム容器に貯液し、 ヒ ータによって熱負荷をかけ、4.16kWの冷凍能力を確認した。 また、液体ヘリウム容器からの低温ヘリウムガスをトランス ファラインに流し、平均流量とトランスファライン各部の温 度上昇から、トランスファラインへの侵入熱を測定した結果, 0.5 W/mであった。共に仕様値を満たすものである。



一般に膨張タービンの効率は、速度比 $\frac{U}{C}(U: n - p)$ 周速度、

C。: 全断熱熱落差相当速度)が0.6~0.7付近に最高効率点が 存在する。 超臨界膨張タービンでは断熱熱落差が小さいため, Coが小さくなるので効率を維持するためにUを小さくする必 要がある。そのため回転数が低くなる。

(2) タービン入口状態での流体密度が大きい。

入口状態である超臨界へリウムは、通常のヘリウムガスと 液体ヘリウムとの中間状態に位置し, 高圧・極低温のため密 度が大きくなるため、体積流量が小さくなり、 ロータ外径が 小さくなる。

(3) 制動ファン外径の大型化

制動ファンで、ヘリウムガスを昇圧することによって外部 に仕事を取り出すが、(1)に示した理由によって回転数が低く なるため、相対的にファン外径を大型化する必要がある。

従来,実績のある日立製膨張タービンに上記の配慮をして開 発した超臨界膨張タービンを図9に示す。制動クーラにはハ ンプソン式熱交換器を採用し、タービンと一体化を図った4)。



63

図7 CRT画面表示例 システム全体の運転状況を表示しており, 機器の運転モード、液体ヘリウム、ヘリウムガスなどの保有量を表示し ている。

1054 日立評論 VOL. 71 No. 10(1989-10)



超臨界膨張タービン構造図 制動クーラとしてハンプソン式 図 9 熱交換器を採用しており、タービン本体と一体化でき、コンパクトにな っている。

社内ヘリウム タービン テスト スタンドで, 回転テストお よび起動・停止回数100回を実施し、機械的安定性を確認した。 また,部分負荷(流量2,300 Nm<sup>3</sup>/h,入口圧力1 MPa,入口温 度23 K)での性能を確認し、仕様条件でタービン効率70%の見 通しを得た。実験結果を図10に示す。

#### 言 6 結

64

超伝導高周波加速空洞がこのような大規模な形で実用化さ れたことは世界的にも例がなく,またその冷却用のヘリウム 液化冷凍システムは、4 kW(at 4.4 K)という国内最大容量の 記録品であったが、1988年11月、無事ビームの加速に成功し 所期の目的を達成した。 高効率で信頼性が高く,拡張性のあるシステムとするため.

システムの大型化, 効率向上, 高信頼性がさらに求められて いくものと考えられる。本システム構築の経験が若干でも今 後の参考になれば幸いと考え、ここに紹介したものである。

終わりに、本システムの開発に当たりご指導いただいた高 エネルギー物理学研究所の木村嘉孝総主幹、黒川真一主幹を はじめ関係各位に対して、心からお礼を申しあげる次第である。

## 参考文献

- Y. Kimura : TRISTAN Project and KEK Activities, Proc. 1) XIII the International Conference on High Energy Accelerators(1986)
- Y. Kojima : Research on Superconducting RF Cavities at 2)KEK, Proc. XIth International Conference on Cyclotrons

and their Applications (1986) K. Hara, et al. : Cryogenic System for TRISTAN 3) Superconducting RF Cavity, Advances in Cryogenic Engineering, **33**, 615~622(1988) 4)

岡本,外:超臨界ヘリウムタービンの開発(1),第40回低温工 学・超伝導学会予稿集, C1-2(昭63-11)