

JAEARI-M
94-054

原研 A V F サイクロトロン装置の電源系

1994年3月

中村 義輝・横田 渉・奥村 進・福田 光宏
奈良 孝幸・上松 敬・石堀 郁夫・荒川 和夫
星加 敬三*・佐藤 岳実*

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

原研AVFサイクロトロン装置の電源系

日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用推進室

中村 義輝・横田 渉・奥村 進・福田 光宏

奈良 孝幸・上松 敬・石掘 郁夫・荒川 和夫

星加 敬三*・佐藤 岳実*

(1994年2月17日受理)

イオンビームを用いた放射線高度利用研究を推進する中核の加速器として、AVFサイクロトロン装置が高崎研究所に導入された。このサイクロトロン装置は、電磁石系、RF系、ビーム診断系、計算機制御系、真空排気系等々の機器から構成され、それぞれの機能に応じた電源が設置されている。

本報告書は、サイクロトロン装置の電源系に関するものであり、最初にイオン照射研究施設への一次側受電系統と、サイクロトロン装置への二次側給電系統について触れ、次に同装置の電源の構成内容について記述した。またサイクロトロン装置用電源のうち、特に数量の多い電磁石用電源については、負荷電流の安定度やリップルなどの測定結果も掲げた。

さらに遮蔽壁を貫通している屈曲スリーブ中に敷設されているケーブル集合体の温度上昇の評価、および実際の温度測定結果についても述べた。

高崎研究所：〒370-12 群馬県高崎市綿貫町1233

* 住友重機械工業株式会社

Power Supply System for JAERI AVF Cyclotron

Yoshiteru NAKAMURA, Watalu YOKOTA, Susumu OKUMURA
Mitsuhiko FUKUDA, Takayuki NARA, Takashi AGEMATSU
Ikuo ISHIBORI, Kazuo ARAKAWA, Keizou HOSHIKA*
and Takemi SATOH*

Department of Advanced Radiation Technology
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(February 17, 1994)

An AVF cyclotron (K number : 110) system, which is main accelerator to promote for advanced radiation application using various ion beams, has been introduced in Takasaki Establishment of JAERI. This cyclotron system consists of electro-static magnet, radio frequency, beam diagnostic, computer control, vacuum, cooling systems and power supplies for these systems are equipped according to the function of their loads.

This report describes the power supply system for the cyclotron. The primary electric-supply lines to TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) facility and the secondary ones to the cyclotron system are explained briefly, then the construction of power supplies for the cyclotron system is illustrated. Measurement results of current stability and ripple are shown in regard to the power supplies for magnets which have occupied in the great part of them, especially.

Temperature rise of assembled power cables into a bent sleeve which has penetrated across the shielding wall was estimated, and temperature measurement was also carried out practically.

* Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Keywords : Cyclotron, Power Supply, Radiation Resistance Cable,
Electric-supply Lines, Transistor Bank, Current Stability,
Current Ripple, Temperature Rise

目 次

1.はじめに	1
2.サイクロトロン装置関連電源設備の検討	4
2.1 TIARA施設電気関係設備の設計	4
2.2 サイクロトロン装置電源系の検討	5
3.サイクロトロン装置電源系の構成	6
3.1 TIARA施設一次側受電系統の概要	6
3.2 サイクロトロン装置電源系の内容	7
3.2.1 サイクロトロン装置構成機器の略号表記	7
3.2.2 二次側サイクロトロン受電系統	8
3.2.3 各受電系統の内容および電流測定結果	9
3.2.4 電源の構成および特性測定	10
3.2.5 電源の共用化	16
4.管路内ケーブル集合部分の温度評価および測定結果	42
4.1 ケーブルの内部発熱に伴う温度上昇の評価	42
4.2 温度測定結果	46
5.あとがき	54
謝辞	54
参考文献	55
付録 TIARA施設およびサイクロトロン装置の概要	56

Contents

1. Introduction	1
2. Consideration of Power Supply System for Cyclotron	4
2.1 Design on Electric Equipments and Devices for TIARA Facility	4
2.2 Consideration for Power Supply System of Cyclotron	5
3. Construction of Power Supply System for Cyclotron	6
3.1 Outline of Primary Electric-supply Lines to TIARA Facility	6
3.2 Construction of Power Supply System for Cyclotron	7
3.2.1 Simplified form of Components for Cyclotron System	7
3.2.2 Secondary Electric-supply Lines to Cyclotron System	8
3.2.3 Construction of Each Electric-supply Lines and Result of Current Measurement	9
3.2.4 Construction of Power Supplies and Measurement of Their Characteristics	10
3.2.5 Common-use of Power Supplies	16
4. Temperature Evaluation and Measurement Result at Assembled Cables into Bent Sleeve	42
4.1 Evaluation of Temperature Rising Induced to Internal Heating of the Assembled Cables	42
4.2 Result of Temperature Measurement	46
5. Summary	54
Acknowledgement	54
References	55
Appendix Outline of TIARA Facility and Cyclotron System	56

1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所では、これまで研究開発を進めてきたガンマ線および電子線の照射利用研究に加え、イオンビームを利用した放射線高度利用研究を開始し、放射線利用の新たな展開を図る研究計画¹⁻⁵⁾が進行している。放射線高度利用研究の主要な研究課題は、1) 宇宙用半導体ディバイス、構造材料および核融合炉材料などの耐放射線性の研究開発、2) 環境耐性遺伝子資源や生体物質の放射線化学などのバイオ技術の研究、3) 新物質創成・改質および機能発現機構などの新機能材料の研究等である。

これらの研究開発を推進するため、昭和62年度からの6ヶ年計画により、イオン照射研究施設(T I A R A : Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application)の建設が行われた。原研AVFサイクロトロン装置は、T I A R A施設(Fig. 1A およびFig. 1B 参照)に設置された4台の加速器のうち最も高いエネルギーのイオンビームを発生することができ、機能的には電磁石系、R F系、ビーム診断系、計算機制御系、電源系等々に分類される。

本報告書は、これらサイクロトロン装置全体の構成要素のうち電源系について記述したものである。電源系の検討では、まずT I A R A施設およびサイクロトロン装置それぞれについて基本的な設計指針を掲げ、次にそれらの具体的な構成内容を明らかにした。また受電系統別の電流や代表的な電源の安定度等を測定することにより、電源系についての総合的な特性を評価した。さらに管路内ケーブル集合部分の温度上昇が問題となる可能性が生じたため、それらの解析および温度測定を行い安全性を確かめた。

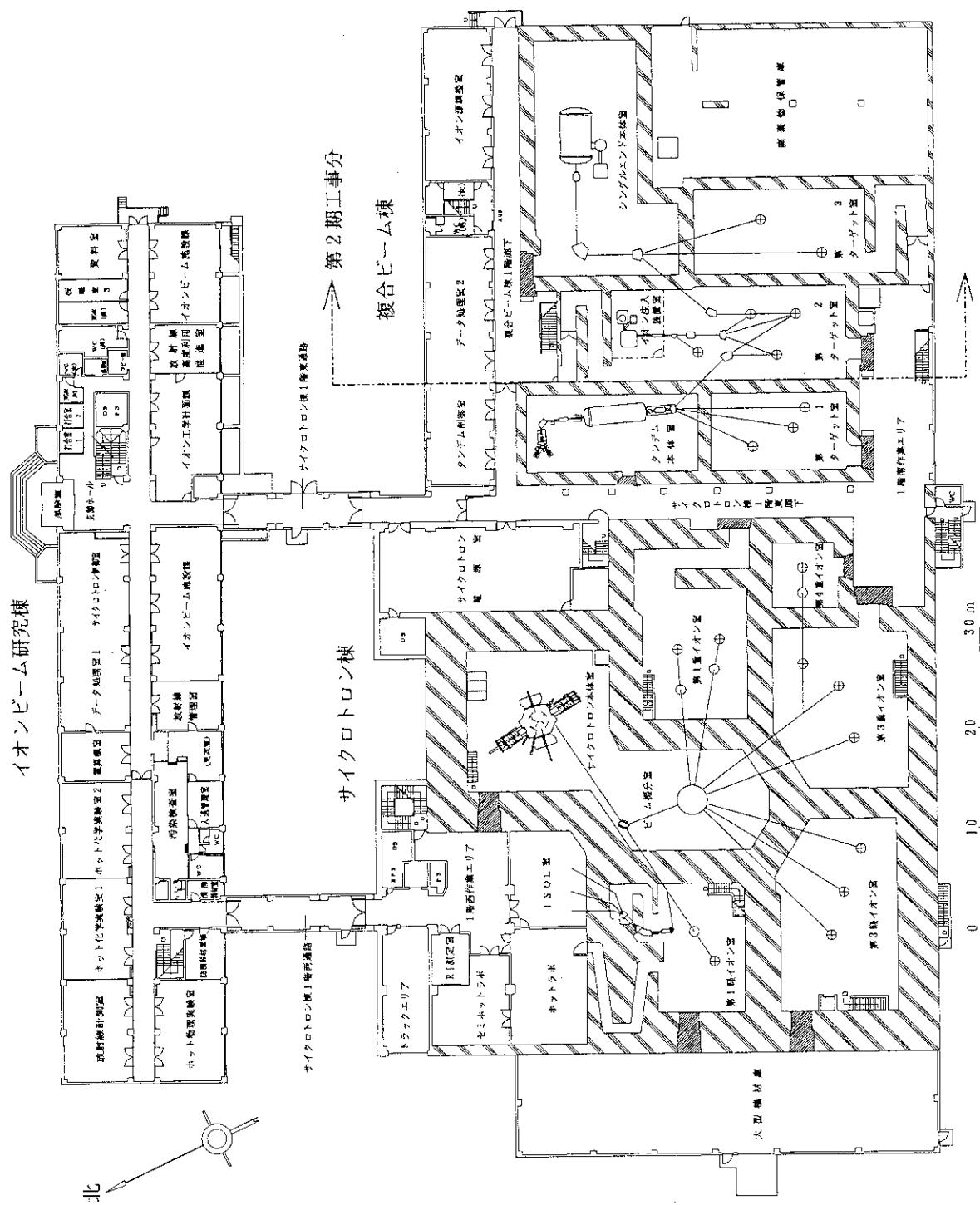


Fig. 1A イオノ照射研究施設 1 階平面図

イオンビーム研究棟

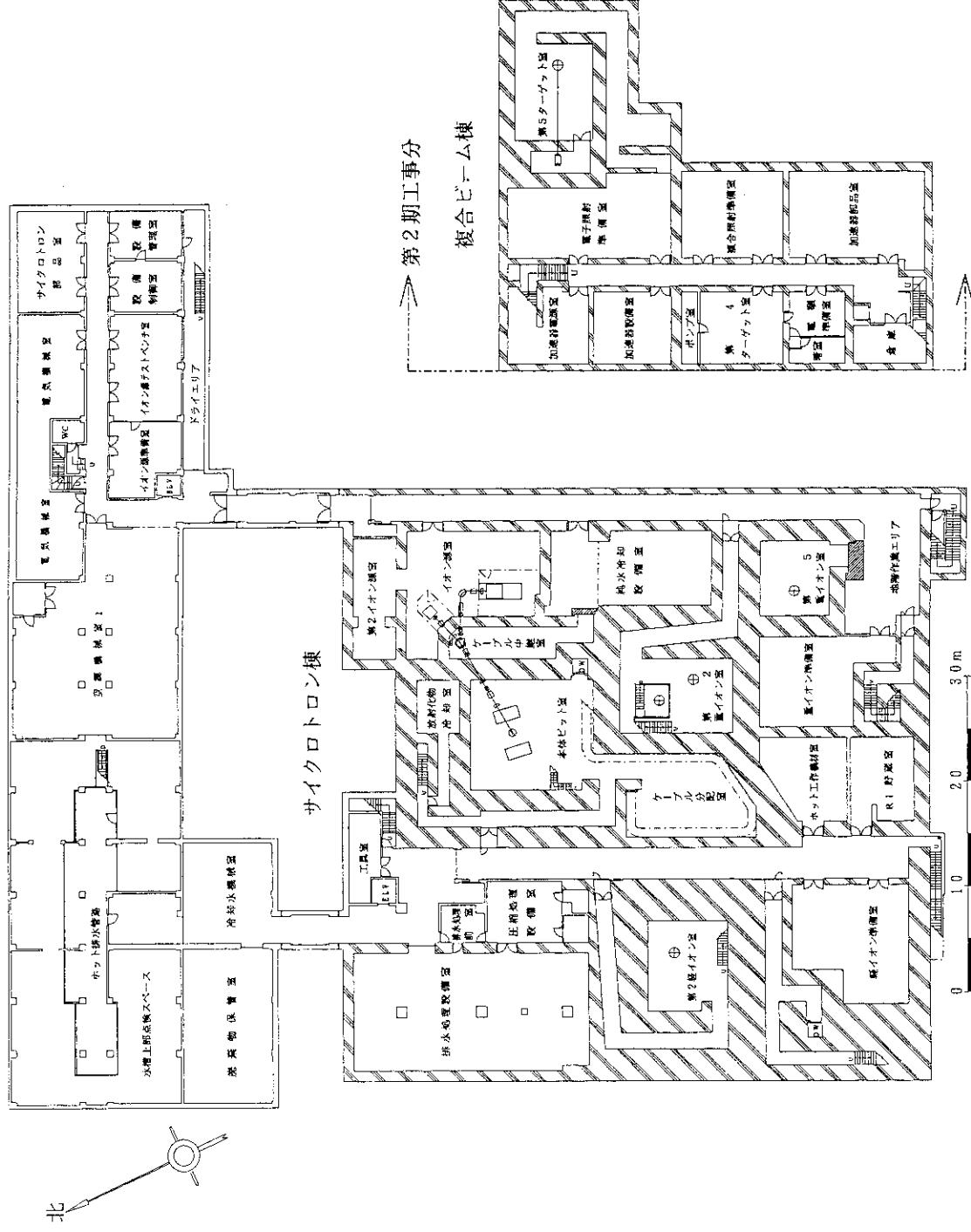


Fig. 1B イオン照射研究施設地階平面図

2. サイクロトロン装置関連電源設備の検討

2. 1 T I A R A 施設電気関係設備の検討

T I A R A 施設における電気関係装置・設備の全体的な仕様を検討するにあたって、サイクロトロン装置との関連から考慮した建屋構造、あるいは建屋関連設備についての主要な内容を以下に示す。

(1) サイクロトロン電源室は、サイクロトロン制御室との間で最も頻繁にアクセスすることが予測されるため、非管理区域内のできるだけ近い場所で1階に配置する。また各イオン室内の電磁石などへの給電は、サイクロトロン棟のほぼ中央に位置するケーブル分配室から、負荷切替盤を用いて効率的に行う。

(2) ケーブル類をケーブルラック、埋め込みスリーブ、ピット・トレーニングなどに収納する場合は、電力系（強電用）と信号系（弱電用）とに分離する。ビーム振分室および各イオン室のビームライン両側に床トレーニングを設け、それぞれ冷却水・圧空・窒素ガス系配管と電力・制御用ケーブルに分離して敷設する。

(3) ケーブル敷設量が特に多く、さらに新たなケーブルの追加やそれらの変更等が予測されるサイクロトロン制御室およびサイクロトロン電源室については、フリーアクセスフロアの構造を採用する。

(4) サイクロトロン本体室～各イオン室間およびイオン室相互間の放射線遮蔽壁、さらには一般の間仕切り部分等には、建屋建設時にあらかじめダクト・スリーブなどを埋め込んでおく。これらのうち遮蔽壁を貫通するスリーブを用いる場合には、適切なケーブル布線率を確保するとともに、空間部分にはケーブルなどの遮蔽体を挿入する。

(5) 空調設備等への熱負荷を軽減するため、電源盤等は機能的な水冷構造を採用し、それらの周囲から大気中に発散する熱量をできるだけ抑制する。

(6) サイクロトロン装置は広範囲に設置され、しかも大電流を通電する機器が多いこと、実験者側へのノイズ等の影響ができるだけ抑制することなどの観点から、第1種接地相当のサイクロトロン専用アースを設備する。このアース極の設置場所は、本体ピット室およびサイクロトロン制御室とする。

なおアース用銅電極は、サイクロトロン棟とイオンビーム研究棟間の中庭（サイクロトロン本体室北側位置）の地中105mに埋設された。このアース電極の接地抵抗は、1992年の5月下旬に大地比抵抗測定器（横河電機製3244型）を用いて測定した結果、約0.8Ωであった⁶⁾。

(7) T I A R A 施設の非常用（E G）電源設備および無停電電源設備については、施設単独では両者の設備は設置しない。

2. 2 サイクロトロン装置電源系の検討

原研 A V F サイクロトロン装置で使用する電源は、各種電磁石などのための直流定電流電源と、イオン源引出し系、サイクロトロン本体静電偏向系、R F 系などの直流高電圧電源、駆動系および制御回路用などを含む直流定電圧電源、その他一般商用交流電源などに大別される。これらの電源の基本仕様は、耐電圧、絶縁など通常電源が具備すべき一般的性能のほかに、それぞれの系統で使用される負荷機器の使用条件（例えば電流安定度あるいはリップル含有率など）に応じて決定される。

サイクロトロン装置全体での最大使用電力は、1 8 0 0 k V A 程度と積算されたが、それらの大半が各種電磁石で消費されるものと想定される。このためサイクロトロン装置側において受電時の無効電力補償装置（進相機）の設置を検討したが、他類似施設における力率の実績値は約 8 5 %⁷⁾であったことから、本装置には特にこの装置は設けないこととした。

電源関係の仕様を検討するにあたって考慮した主要な項目を、以下に掲げる。

(1) サイクロトロン本体のメインコイル、トリムコイル、さらにはビーム輸送系の分析・偏向電磁石、4 極電磁石などの大電流電源については、低リップルの安定化電源とする。また従来から使用されている S C R 内蔵型電源では、S C R 素子のスイッチング時にパルス状の大電流が流れるので、微小信号の計測・制御回路などへのノイズの影響が予測されるため⁷⁾、可飽和リアクトルおよびパワートランジスターを用いた方式のものを採用した。

(2) 電磁石用電源の安定度は、それぞれの電磁石で規定されている磁場安定度を満足するように設計する。例えばビーム輸送系の4 極電磁石では $\pm 1 \times 10^{-4}$ 以下、分析電磁石では $\pm 1 \times 10^{-5}$ 以下などとする。電源の電流容量は、最大発生磁場に対応した励磁電流に 1 0 % 程度の余裕を見込む。

また偏向電磁石やステアリング電磁石など、極性を変更する必要がある機器については、遠隔での極性切り換えの機能を持たせる。

(3) ビーム輸送系の4 極電磁石や偏向電磁石など、同じ性能・仕様の機器が多数設置されているもので、常時そのうちの一部分の使用のみに限定されている機器については、それらの電源を共用で使用して機器利用の効率化を計る。なお共用電源の切り換えも、制御室から遠隔で行えるようにする。

(4) 装置全体に使用する電線・ケーブルは、原則として難燃性仕様⁸⁾のものとする。さらにサイクロトロン装置の電磁石などに使用する電力ケーブルは、中性子線およびガンマ線などの混合放射線場、さらにはオゾン等の有害ガス雰囲気における長期間の使用が予想されるため、耐放射線性および耐環境性に優れたケーブルを使用する。

(5) 各電源盤内には、電源回路等の焼損を防止するため煙感知器を設け、制御室内でその信号を常時監視できるようにする。

(6) サイクロトロン照射装置の各種電源は、そのほとんどがサイクロトロン

棟 1 階のサイクロトロン電源室内に設置される。したがってケーブルルートについては、イオンビームの進行方向に沿って通線するのを原則とし、1) 電源室内の配線用ピット部分から、地階のケーブル中継室に立ち下げる、2) ケーブル中継室から本体ピット室中 2 階に貫通させる、さらに 3) 中 2 階からサイクロトロン本体室までのルート、およびケーブル分配室を経由して各イオン室に振り分けるルートの 2 系統に分離する方法とする。

3. サイクロトロン装置電源系の構成

3. 1 T I A R A 施設一次側受電系統の概要⁹⁾

従来の高崎研究所の受電設備は、高圧 6. 6 kV の 2 回線（常用 1 回線、予備 1 回線）受電方式であり、契約電力は 1200 kW であった。またそれまでの最大受電電力の実績値が、平成元年度の段階ですでに契約電力を超える 1400 kW の状態となっていたため、平成 2 年度には契約変更が必要となっていましたこと、さらに平成 3 年度から T I A R A 施設の稼動が予定されており、新たに 5200 kVA 程度の電力の大幅な増加が見込まれること、などの状況から契約電力の変更を行うこととなっていた。

このためそれまでの高圧 6. 6 kV 受電契約から、特別高圧 66 kV の受電契約に変更されるとともに、従来の変電所は廃止されて代わりに 66 kV の中央変電所が新設された。なお特別高圧受電設備は、すでに平成 2 年 6 月から運用が開始されている。

中央変電所およびイオン照射研究施設に供給されている電源系統の簡略化した幹線結線図を Fig. 2 に示す。商用系の供給電力は、3 相 3 線式、電圧 66 kV、皮相電力 7500 kVA および周波数 50 Hz である。変電所には、1 号（予備）線および 2 号線からなる 66 kV の 2 つの送電系統が接続されているが、通常時にはこのうち 2 号線から受電が行われている。また送電系統は、ループ切り換えによる無停電状態での系統切り換えが可能となっており、送電線の事故以外には停電が発生しない方式となっている。さらに受電線の事故に起因する停電時には、停電発生から 2 s 後に 2 号線から予備線系統へ自動切り換えが開始され、5 ~ 7 s 後には切り換えが完了となる。

中央変電所では、1 号線および 2 号線の 2 つの商用系統が、真空遮断器（V C B : Vacuum Circuit Breaker）により 1 系統に選択された後、変圧器により 66 kV からその 1 / 10 の 6. 6 kV に降圧される。さらにこの系統は、V C B を介して 16 回線に分岐されるが、このうち 12 回線は高崎研究所内の各建屋あるいは施設に、2 回線が予備に、1 回線が非常系に、残りの 1 回線が功率改善用コンデンサー（500 kVA × 3 台）に分配されている。

また中央変電所内には、非常系の電力供給源として 6. 6 kV、500 kVA の容量を持つ出力 600 ps のガスタービン発電機が設置されている。この発電機からの非常用電力系統は 3 回線に分岐されており、このうちの 1 系統がさらに変圧器で降圧された後所内の各施設に供給されている。

T I A R A 施設への電力供給幹線は、商用系として前述の 12 回線のうちの 1 回線（3 相 3 線式、6. 6 kV、ケーブル断面積 325 mm²）が、同様に非常系として 3 回線のうちの 1 回線（3 相 3 線式、6. 6 kV、38 mm²）が敷設されている。T I A R A 施設に供給されている幹線電力の単純積算値は 57

棟 1 階のサイクロトロン電源室内に設置される。したがってケーブルルートについては、イオンビームの進行方向に沿って通線するのを原則とし、1) 電源室内の配線用ピット部分から、地階のケーブル中継室に立ち下げる、2) ケーブル中継室から本体ピット室中 2 階に貫通させる、さらに 3) 中 2 階からサイクロトロン本体室までのルート、およびケーブル分配室を経由して各イオン室に振り分けるルートの 2 系統に分離する方法とする。

3. サイクロトロン装置電源系の構成

3. 1 T I A R A 施設一次側受電系統の概要⁹⁾

従来の高崎研究所の受電設備は、高圧 6. 6 kV の 2 回線（常用 1 回線、予備 1 回線）受電方式であり、契約電力は 1200 kW であった。またそれまでの最大受電電力の実績値が、平成元年度の段階ですでに契約電力を超える 1400 kW の状態となっていたため、平成 2 年度には契約変更が必要となっていたこと、さらに平成 3 年度から T I A R A 施設の稼動が予定されており、新たに 5200 kVA 程度の電力の大幅な増加が見込まれること、などの状況から契約電力の変更を行うこととなっていた。

このためそれまでの高圧 6. 6 kV 受電契約から、特別高圧 66 kV の受電契約に変更されるとともに、従来の変電所は廃止されて代わりに 66 kV の中央変電所が新設された。なお特別高圧受電設備は、すでに平成 2 年 6 月から運用が開始されている。

中央変電所およびイオン照射研究施設に供給されている電源系統の簡略化した幹線結線図を Fig. 2 に示す。商用系の供給電力は、3 相 3 線式、電圧 66 kV、皮相電力 7500 kVA および周波数 50 Hz である。変電所には、1 号（予備）線および 2 号線からなる 66 kV の 2 つの送電系統が接続されているが、通常時にはこのうち 2 号線から受電が行われている。また送電系統は、ループ切り換えによる無停電状態での系統切り換えが可能となっており、送電線の事故以外には停電が発生しない方式となっている。さらに受電線の事故に起因する停電時には、停電発生から 2 s 後に 2 号線から予備線系統へ自動切り換えが開始され、5 ~ 7 s 後には切り換えが完了となる。

中央変電所では、1 号線および 2 号線の 2 つの商用系統が、真空遮断器（V C B : Vacuum Circuit Breaker）により 1 系統に選択された後、変圧器により 66 kV からその 1 / 10 の 6. 6 kV に降圧される。さらにこの系統は、V C B を介して 16 回線に分岐されるが、このうち 12 回線は高崎研究所内の各建屋あるいは施設に、2 回線が予備に、1 回線が非常系に、残りの 1 回線が功率改善用コンデンサー（500 kVA × 3 台）に分配されている。

また中央変電所内には、非常系の電力供給源として 6. 6 kV、500 kVA の容量を持つ出力 600 ps のガスタービン発電機が設置されている。この発電機からの非常用電力系統は 3 回線に分岐されており、このうちの 1 系統がさらに変圧器で降圧された後所内の各施設に供給されている。

T I A R A 施設への電力供給幹線は、商用系として前述の 12 回線のうちの 1 回線（3 相 3 線式、6. 6 kV、ケーブル断面積 325 mm²）が、同様に非常系として 3 回線のうちの 1 回線（3 相 3 線式、6. 6 kV、38 mm²）が敷設されている。T I A R A 施設に供給されている幹線電力の単純積算値は 57

50 kVAであり、前述の受電電力7500 kVAの77%に達している。

これらのうち商用系は、VCBあるいは高圧交流負荷開閉器（LBS：AC Load Break Switch for 6.6 kV）によりさらに8系統に再分岐されている。この8系統のうちの4系統が、3相3線式の420Vおよび210VのA～D系統に接続されている。また1系統がさらに単相3線式210/105VのEおよびF系統に再分割され、2系統が単独でそれぞれ高圧ターボ冷凍機（280 kW）に直接接続され、残りの1系統は非常系と切り換えて使用されるG、HおよびI系統に供給されている。

一方非常用電力は、商用系停止の信号により自動的にVCBおよび双方向投入型真空開閉器（VSDT：Vacuum Switch - Double Throw）によって商用系から切り離された後、G系統（3相3線式210V）、H系統（単相3線式210/105V）およびI系統（3相3線式420V）の3系統に給電される。商用系から非常系への切り換えは、停電発生から10sで非常用発電設備が起動され、50s後には電圧が確立された後、1min以内に送電が開始されて、非常系に接続された機器に給電できる設計となっている。

サイクロトロン装置のための電源としては、3相3線式420VのA系統、3相3線式210VのD系統、単相3線式210/105VのEおよびF系統が供給されているが、これらはいずれも6.6 kVの高圧から変圧器により再度降圧された商用系の系統である。

T I A R A 施設において非常系に接続されている主要な機器装置は、放射線や人身の安全管理に直接関係する放射線モニター装置、インターロック・安全表示設備、入退室管理装置、換気装置、エレベーター等々であり、サイクロトロン装置には非常系は接続されていない。なお商用系から非常系への切り換え時間は、実際に商用系停電試験を実施した結果約55s程度であり、特に安全上の問題は生じないことが確かめられた。

3. 2 サイクロトロン装置電源系の内容

3. 2. 1 サイクロトロン装置構成機器の略号表記

サイクロトロン装置全体を構成するそれぞれの機器は、多種類のものが広範囲に配置されており、また電磁石など同一性能のものが多数設置されている。これら多数の機器を効率的かつ容易に識別できるようにし、さらに制御系などのパラメータ名としても統一して使用するため、サイクロトロン装置では略号を用いて記述することとしている。

以下に略号表記の具体例を示す。

- ・ T C G H E 2 _ P I : ビーム輸送系に設置されているコンビネーションゲージで、HEコースの上流側から2番目のもののうちのピラニゲージ。
- ・ C C C 8 : サイクロトロン本体系の磁場補正用サーフィュラートリムコイルで、12組のうちの内側から数えて8番目のもの。
- ・ I S D 5 : イオン入射系のソレノイドレンズで、上流から見て5番目のも の。

これらの例で示したように、最初の英1文字が各系統、即ちE：ECRイオン源系、M：マルチカスプ（Multi-cusp）イオン源系、I：イオン入射系、C：サイクロトロン本体系およびT：ビーム輸送系を示す。次の英1～2文字が

機器名（前述の例では C G : Combination Gauge、 C C : Circular trimming C oilなど）を示し、次に続く英2文字が設置されている場所（H E : HE course）を表している。さらにその次の数字は、機器が複数個設置されている場合の通し番号、あるいはビーム上流側から見た順番（2、8あるいは5）であり、アンダースコアー以下の英文字が個別機器のうちの細分化した部分、あるいはパーツ（P I : Pirani gauge）等を意味する。

以下の本文内容および図・表等については、必要に応じてこれらの略号を用いて記述した。

3. 2. 2 二次側サイクロトロン受電系統

サイクロトロン装置用の電源は、イオンビーム研究棟地階の電気機械室からバスダクト等により一括して供給されている。これらの簡略化した受電系統図をFig. 3に示す。なおFig. 2の幹線結線図中に示されている2次側電圧420V、210Vおよび105Vの系統については、サイクロトロン装置側ではそれぞれ415V、200Vおよび100Vとして呼称・記名等を行っているため、以下についてはこの電圧で記述した。サイクロトロン本体系およびビーム輸送系などに使用している電磁石は消費電力が大きいため、供給電源にはAC415V(3φ)を用いているが、その他のイオン源・イオン入射系および純水冷却設備等にはAC200V(3φ)を使用している。

交流電力は、サイクロトロン棟1階のサイクロトロン電源室(415V、200Vおよび100V)、サイクロトロン棟地階のイオン源室(200Vおよび100V)と純水冷却設備室(200Vおよび100V)、イオンビーム研究棟1階の制御室(100V)の4ヶ所の分電盤に供給されている。

さらにそれぞれの分電盤内部には、電磁遮断器(MCB: Magnetic Circuit Breaker)あるいは漏電遮断器(ELB: Earth Leakage Breaker)を配置して、必要な分岐回路を構成するとともに、電気工作物保安管理上の責任境界を明確にしている。分電盤内部における系統図の例を、Fig. 4A～Fig. 4Cに示す。このうちFig. 4Aは、サイクロトロン本体系の415V系統(Photo. 1参照)の一部であり、メインコイル(CMM: Main Magnet)およびサーチュラートリムコイル(CCC)の回路である。例えばCMM用電源の記号はCYC_POW_10であり、最大定格が288.5V×900Aと大容量のため単独の電源となっている。またこの系統は、分電盤内で定格電流500AのMCBにより幹線回路から分岐されている。

一方CCCについては、それぞれのコイルに必要な電源容量が比較的小ないので電源は一体型となっており、CCC1～CCC8までの8回路分がCYC_POW_30の電源盤内に収納されている。

Fig. 4BにはECRイオン源の200V系統の一部分を示すが、この系統にはNo. 1～No. 4のソレノイドコイル、マイクロ波電源、分析電磁石等が接続されている。またFig. 4Cはサイクロトロン本体関係の100V系統であるが、回路遮断器には415V系や200V系のMCBとは異なりELBが設置されている。電源の大部分がディストリビューターへ供給されており、ここでの負荷はビーム輸送系のコントロールラック(BT_CNT_1、BT_CNT_2等)が主要なものである。

これら分電盤部分の電気回路は、使用されているブレーカーの定格電流容量

が異なっているものの、それらの構成はほとんど同一の形態となっている。各電源からそれぞれの負荷までの接続ケーブルは、耐放射線性を考慮して主としてP N C T (E P ゴム絶縁ネオプレンキャブタイヤ) ケーブルが使用されている。なおサイクロトロン本体系の電磁石に使用している電力ケーブルのうち公称導体断面積 150 mm^2 のものについては、超耐放射線性のF S R - 2 P H C T^{10), 11)} (古河電工製、超耐放射線性 - E P ゴム絶縁ハイパロンキャブタイヤケーブル) を使用した。これらのP N C T およびP H C T ケーブルは、耐放射線性が高い内側のE P ゴム絶縁体と、高度の難燃性を有する外側のネオプレンあるいはハイパロンシースにより、機能的な2重構造となっているものである。

3. 2. 3 各受電系統の内容および電流測定結果

415 V、200 Vおよび100 V系統の負荷内容および電流測定結果の一例をTable 1A～Table 1Dに示す。電流測定を実施した時のサイクロトロン装置の運転状態は、第4重イオン室のHE2ビームポートが選択されており、加速イオン種 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 、エネルギー460 MeV(公称値)、ビーム電流約2e n Aであった。系統の電流値測定にはデジタルクランプメーター(HIOKI製、3261型)を使用し、分電盤内のケーブル通線部分で実測した。

これらのうちTable 1Aは415 V系統の電源内容およびその測定結果である。前述の $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 、460 MeVの運転では、引き出し部の平均磁場が1.66 Tと高いため、CMM用電源(CYC_POW_10)への3相交流入力電流も410 Aと大きい。この時のCMMへの負荷電流は、最大出力電流900 Aに対して868.6 Aとなっており、96.5 %の高負荷率である。この他マグネティックチャンネル(CMC: Magnetic Channel)についてもその電源(CYC_POW_20)への入力電流は、ブレーカー容量200 Aに対して172 Aとなっており、14 %の余裕となっている。この時の負荷電流は、1225 A(最大出力電流は1300 A)であり、負荷率は約94 %にも達している。しかしRF系はディー電圧が33.6 kVであり、最大電圧の60 kV発生時の電力量に比べて、約30 %の負荷状態となっている。415 V系統全体での入力電流は、電気機械室内一次側のケーブル(No. 41C-101)で約1100 A(単純積算値では1138 A)であった。

同様にTable 1Bは、200 V系統の負荷内容およびその測定結果を示す。この系統でのサイクロトロン本体系の負荷内容は、ヨークリフト、インフレクター、ブラーおよびデフレクター自動化装置など、サイクロトロン停止時に使用する装置が多いため、系統全体での電流は小さな数値となっている。

Table 1Cには、イオン源およびイオン入射系での200 V系統の結果を示す。この系統では、ECRイオン源の4ヶのミラーコイルおよび入射系のソレノイドレンズなど、電磁石関連の入力電流が約340 Aとなっており、系統全体の電流460 Aの73 %とその大部分を占めている。

Table 1A～Table 1Dに示されている系統全体での使用電力積算値は、415 V系が1138 Aで820 kVA、200 V系が990 Aで340 kVA、100 V系が183 Aで18 kVAであり、合計で約1180 kVAとなった。当初の設計段階における最大使用予測電力は約1800 kVAであったが、この数値については1) 共振器の構造が従来のムービングパネ

ル型であるとして、その電力積算値（約300kVA）を使用していた、2)。冷却系の冷水槽やクーリングタワーの循環ポンプなど冷却系2次側機器への供給電力（約200kVA）も見込まれていた、3) BT系では多少の予備電力（約40kVA）が積算されていた、などの点が実際の消費電力との大きな相違点となっている。サイクロトロン装置受電系統の電流測定は、前述のように $^{40}\text{Ar}^{13+}$ の460MeVでの運転で、ビームラインとしてはほぼ最長コースのHE2ポートを選択した時に実施したものである。この時の運転において、ビームライン最長のHZ1ポートを仮定し、さらに比較的消費電力が大きいと考えられる機器で動作していなかったものは、1) 偏向電磁石（TBMHz）、2) S型ビームチョッパー、3) ビームスキャナーおよび4) マルチカスプイオン源などであった。

これらの全体的な機器の動作状態および設計段階との相違点などを考慮すると、使用皮相電力積算値1180kVAの設計値1800kVAに対する割合66%は、ほぼ実態を反映した妥当な数値であると予測される。

また $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 、460MeVでのサイクロトロン運転時における各系統および負荷内容別の電力消費の割合を、Table 2に示す。この運転条件においては、系統別の内訳ではサイクロトロン本体系が54%と最も多く、次にビーム輸送系の20%となっている。一方負荷内容の内訳では、電磁石の消費電力の割合が全体の74%とその大部分を占めており、次に冷却系11%、RF系7.4%、真空系3.7%などの順番となっている。これらの使用電力のうち、サイクロトロン装置の運転状態にほとんど依存しないものは、系統ではイオン入射系であり、負荷内容では真空排気系以下の4項目と考えられる。

3. 2. 4 電源の構成および特性測定

サイクロトロン装置の電源は、電磁石用の低圧電源がその大部分を占めるが、このほかデフレクターおよびインフレクターなどの高圧電源、サイクロトロン本体およびECRイオン源などのRF用電源、各種駆動装置用電源等の多種類のものが使用されている。

サイクロトロン装置に使用されている電源のうち、イオン源関係を除いたものの性能をTable 3A～Table 3Fに示す。ここではそれらのうち最も数量が多い電磁石用電源について、その内容を記述する。

電磁石用電源は、イオン入射系のソレノイドレンズ(SD)およびステアリング電磁石(ST)、サイクロトロン本体系のCコイル(CCC)あるいはグレーザーレンズ(GL)、ビーム輸送系の4極電磁石(Q)など、10V～100V程度の低圧電源がその大部分を占める。しかしサイクロトロン本体のメインコイル、ビーム輸送系の分析電磁石、偏向電磁石およびスイッチング電磁石など、大きな起磁力を必要とするものについては、100～300V程度の出力電圧となっている。出力電流については、入射系機器の数10A程度から、サイクロトロン本体のマグネティックチャンネルの1300Aまで、それぞれの必要な起磁力に合わせて広い範囲で使用されている。

電源の電流安定度は、イオンビームの分析的な用途あるいは使用が想定される電磁石、および特に高い磁場の安定性などが要求されるもの、例えばECRイオン源用分析電磁石(EAM)、ビーム輸送系の分析電磁石(TAM)およびスイッチング電磁石(TSM)などは $\pm 1 \times 10^{-5}$ となっている。しかしS

D、S T、CCC および Q などは $\pm 1 \times 10^{-4}$ あるいは $\pm 2 \times 10^{-4}$ となっている。負荷出力への電流リップルは、各電源の安定度の 10 倍あるいは 20 倍が許容量となっている。

電磁石用電源における 3 相交流入力電流と負荷（出力）直流電流との関係の一例を Fig. 5 に示す。電源 CYC_POW_10 (CMM 用) では、出力電流が約 750 A まで入力電流との間で直線的な増加関係が成立しているが、それ以上の出力電流に対しては飽和傾向が出現している。なお無負荷（負荷電流が 0 A）時の入力電流は 2.5 A (約 1.8 kVA) であり、出力電流 100 A (出力電圧 20.7 V) では入力電流は 23.4 A、最大定格の出力電流 900 A 通電時 (出力電圧 25.7 V) での入力電流は 421 A (M C B 容量は 500 A) であった。したがって電力ケーブルを含む電磁石部分（抵抗値約 0.6 Ω）での直流消費電力が、電源全体としての有効利用電力分であると仮定すると、この電源単独での利用効率は出力電流 100 A ~ 900 A に対して 0.08 ~ 0.76 程度の広い範囲で変化していることになる。

さらに電源 BT_POW_30 (TSM 用) においても、入力電流と出力電流との関係はほぼ同様の傾向となっており、飽和現象は出力電流約 450 A から発生している。最大定格 525 A での入力電流は 151 A であり、出力電圧は 138.9 V であった。したがってこれらの数値から前述と同様の仮定を行うと、この電源の利用効率は出力電流 100 A ~ 525 A に対して、0.12 ~ 0.67 程度まで大きく変化しているものと評価される。

ここで基本的な定電流電源回路図の一例^{12), 13)}を Fig. 6 に示す。この定電流回路は、トランジスター (Tr) のエミッター接地回路であり、出力電流 I_o が流れる回路の途中に電流検出用抵抗 R_a を直列に挿入し、その両端の電圧が一定になるように制御する方式である。差動増幅器を含まない一般的なオープンループの定電流回路では、挿入抵抗 R_a が大きいほど電流安定度は向上するが、それだけ入力電圧を高くしなければならない。したがって大電流を必要とする負荷の電流安定化回路では、 $R_a < R_L$ でないと電力効率が低下する。 R_a の値をあまり大きくしないで、より高い電流安定度を得るには、Fig. 6 のように R_a 両端の電位差を Tr のベースにフィードバックさせて制御する方式が採用される。

また出力電流 I_o となるエミッター電流の大きさは、原理的には Tr のベース電流の制御によって行われるが、実際にはほとんど基準電圧 E_s と挿入抵抗 R_a の比で決定される。

(1) 電源の内部構成

電磁石用電源の構成は、電流容量と無関係にほぼ類似の内容となっており、可飽和リアクトルを含まない電源回路のブロックダイアグラムを Fig. 7 に示す。一次側の供給電源は、負荷の電源容量に応じて 415 V あるいは 200 V の 3 相 50 Hz となっている。電源盤への供給電力は、NFB (Non-Fuse Breaker) を経由して電磁接触器の投入により変圧器に供給された後、ダイオードにより整流されてから平滑回路に導かれる。平滑された直流電流は、Tr バンクで定電流制御され、分流器を通過してから極性切り換え器を経て負荷に供給される。

分流器両端の電圧および線間の出力電圧は、モニターの 4 ch ADC (Analogue-Digital Converter) および Tr ドライバー等に取り込まれ、電流の監視や制御用の信号として利用される。また上位計算機 (GCU : Group Control Unit) からの信号は、MTC (Message Tree Communicator) および MTB (Message Tree Brancher) を介して光リンクで UDC (Universal Device Controller) に供給され、そこから DAC (Digital-Analogue Converter) および誤差アンプを介して Tr ドライバーに伝達される²¹⁾。さらに変圧器、整流器および Tr バンクなどには、過熱防止のためのサーマルスイッチが装備されており、それらのインターロック (IL) 信号はリレー基板に入力されている。これらの IL 信号は、電源盤扉スイッチ、煙感知器、冷却水フロースイッチなどの信号を加えて電源起動の IL 回路に使用され、前述の電磁接触器の動作条件を構成している。またこの IL 信号は、常に制御系最上位の SCU (System Control Unit) まで吸い上げられてモニターされているが、それらのうちいずれか 1 つでもフォルト状態に変化した場合には、制御室のコンソール部分においてメッセージが発せられるとともにアラーム音でも報知される。

なお可飽和リアクトルは、電源容量の大きな電源 { 比較的出力電圧が高い大電流電源であり、例えば、サイクロトロン本体系の CMM 用電源 (CYC_POW_10 : 定格電圧 288.5 V、定格電流 900 A) および CMC 用電源 (CYC_POW_20 : 69.6 V, 1300 A)、ビーム輸送系の TAM 用電源 (BT_POW_10 : 160 V, 290 A) および TSM 用電源 (BT_POW_30 : 155 V, 525 A) など } に対して、Fig. 7 中の NFB と電磁接触器の接点間に挿入されている。

実際にサイクロトロン装置に使用されている電源盤の内部構成例を Photo. 2 に示す。電源の構成は、大別して負荷電流を制御・通電する電力回路部と、制御系との通信や IL 信号などを取り扱うローレベル回路部の 2 つに大別されるが、それらの各要素について以下に簡単に記述する。

A 電力回路部

(a) NFB および電磁接触器

NFB は、3 相の入力電源を電源盤側に供給するための手動投入のスイッチであり、それぞれの負荷内容に応じて異なった定格電流のものが配置されている。電磁接触器は、前述の IL 条件が満足された場合に「ON」状態となり、次項の主トランスの一次側に電圧が印加される。

(b) 主トランス

415 V あるいは 200 V の 3 相交流入力電圧を、必要とする直流出力電圧に応じて降圧する主トランスであり、サーマルスイッチの IL を含んでいる。

(c) 整流器および平滑回路

3 相の全波整流を行うダイオード回路に続いて、その直後にチョークコイル (数 100 μ H 程度) とコンデンサー (15000 μ F が数ヶ～20ヶ程度) から成る平滑回路が配置されている。この整流器部分にもサーマルスイッチの IL が設置されている。

(d) Tr バンク

パワー Tr を並列に接続して出力電流を供給する Tr の集合体であり、構成されている Tr 数量に応じていくつかの水冷構造のブロック (バンク) に分割

されている。使用されている T_r は N P N の低周波数用 2 S D 8 7 3 (東芝) であり、主要な直流特性はコレクターベース間電圧 (V_{CB}) 1 4 0 V、コレクターエミッター間電圧 (V_{CE}) 4 V、コレクター電流 (I_C) 8 A 等である。例えば C M M 用電源 (C Y C _ P O W _ 1 0) では、定格出力電流 9 0 0 A に対して 2 S D 8 7 3 は合計 3 4 0 チップが使用されているので、コレクター電流の合計は約 2 7 0 0 A であり、平均的には 6 6 % の余裕が見込まれることになる。したがって、バンクに配置されている多数の T_r のうちのかなりの数が損傷しても、電源自身の動作には支障を来たさない設計となっているが、実際の電源では T_r 保護用のフューズは、 T_r 1 チップに対してそれぞれ 1 チップずつ配置されている。これらの保護用フューズの個別信号についても、前述の要素と同様 I L に使用されている。

(e) 分流器

精密抵抗による出力電流の基準信号検出部分である。電流安定度 10^{-5} の電源は、この分流器がプラスチックの円筒中に封入された構造となっており、この部分も冷却水による温度コントロールが行われている。分流器両端の電圧信号は、電源の定格電流通電時に 2 V あるいは 3 V となるように設定されており、定電流制御用および表示用として使用されている。

(f) 極性切り換え器

S T や T S M など極性切り換え機能が必要な電源に付加されているものがあり、負荷電流が零の状態で電磁接触器により切り換え動作を行う。極性切り換えは、ビーム輸送における磁場方向の変更のために使用するが、この他磁場形成時における再現性を保証するため、分析電磁石および偏向電磁石の消磁操作などでも必要となる。この消磁操作の運転パターンについて、T A M の例を Fig. 8 に示す。電磁石の励磁電流は、最初に正の極性側で最大電流 2 9 0 A (+ 1 0 0 %) まで増加して 2 3. 5 s 間保持され、次に逆側の負極性の - 9 0 % (- 2 6 1 A) まで変化させて同様に 2 3. 5 s 間維持される。ただしこの間に励磁電流 0 A で 1 5 s 間の待機状態が挿入され、ここで極性切り換え動作が行われる。当初の消磁プロファイルは、励磁電流を正極性から負極性まで直線的に変化させ、0 A 近傍で極性切り換えを行っていた。この切り換え動作では、極性切り換え器の接触片部分でアークが発生して、若干の損傷が認められたことから、Fig. 8 のプロファイルに改造したものである。

さらにそれ以降 1 0 % づつ励磁電流の絶対値を段階的に減少させ、類似の減衰振動的な操作パターンを繰り返しながら、- 1 0 % まで低下させる。その後励磁電流は、この例では設定値 (H⁺、4 5 M e V で L D コース選択時) の + 1 0 4. 2 A まで増加し、消磁操作全てが終了となる。消磁操作における励磁電流の変化率は 2. 7 % / s (7 8 A / s) 一定であり、消磁プロファイルの全プロセスは約 7 9 0 s 間で終了する。

B ローレベル回路部

(a) U D C

U D C は、制御系機器のうち最も制御対象機器に近い下層レベルのコントローラーである。この U D C が実行している主要な機能は、1) 上位計算機システム (G C U) との光リンクを経由した通信、2) 電流等設定値の出力、3) 出力電流、出力電圧の検出、4) 電流安定度のチェック、5) ソフトウェアに

による I L 回路の監視、6) 機器動作状態の読み取り、7) ON/OFF、極性切り換え、消磁などの動作および8) ローカルパネルのハンドリング等である。これらの機能は、UDCに収納されているマイクロプロセッサーの i 8344 (Intel)、16 k byteあるいは32 k byteのROMおよびRAM等により実現されている。

(b) リレーボード

電力回路部に設置されているサーマルスイッチの I L 信号などを使用して、ハードウェアによる I L 回路を構成するためのリレー用基板である。

(c) モニター (4 ch ADC)

出力電圧および出力電流に相当する信号電圧を、デジタル変換するための基板である。基板には4 ch の 12 bit ADC が設置されている。

(d) DAC および誤差増幅器

UDCで出力されたデジタル設定値をアナログ量に変換するための DAC であり、設定値の分解能は 16 bit である。また誤差増幅器 (Error Amplifier) は、DAC から出力された設定値と分流器部分で検出された値とを比較して、この誤差信号を T r バンクのベースにフィードバックし、負荷電流の安定化を計るために使用される。

(e) ローカルパネル

電源の制御操作は、サイクロトロン制御室のコンソールからのリモートモードと、電源盤面（ローカルパネル）でのローカルモードでの 2 つの方法で行える。このうちローカルパネルによる操作は、上位の制御用計算機を経由することなく、直接電源盤内の UDC を動作させることにより、電流設定値の変更や定電流制御などを実現できる。ローカルパネルの代表的な例として、CCC2 の場合を Fig. 9 に示す。このパネル面には、7セグメントの LED 表示器および I L 用の LED 表示灯、さらには極性切り換え [POL(+)/POL(-)]、表示切り換え (DISP.SEL.)、増加／減少 (UP/DOWN) などの操作スイッチ類が配置されている。

7セグメント表示器は、DISP.SEL. スイッチにより表示内容を 4 種類に変更できる。この表示内容は、1) PRESET CURR. : 現在設定されている電流値、2) ACTUAL CURR. : 出力電流値、3) ACTUAL VOL. : 出力電圧値、4) PORT/CRG: DIO、PIO、CRG のデータの 16 進数となっている。

(2) 電源の安定度およびリップル測定結果

電源の安定度およびリップルの測定は、電源が納入された時点 (1991年1月) と、サイクロトロン装置の運転が開始されて約1年半経過した1992年8月、およびそれから1年後の1993年8月の定期点検時に、合計3回実施されている。これら3回の測定データは特に有意差がないため、ここでは2回目の測定結果を掲げた。

A 安定度測定

電源の安定度は、Table 3 A ~ Table 3 F に示したように、接続される負荷の性能に応じて決められており、 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 、 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 、 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 、 $\pm 1 \times 10^{-3}$ などの段階的仕様となっている。ここでは、安定度

$\pm 1 \times 10^{-5}$ の電源である C Y C _ P O W _ 1 0 (負荷は C M M) 、 および I N J _ P O W _ 3 0 (負荷は I B M と I I M) の電流安定度の測定結果を、 それぞれ Fig. 1 0 A および Fig. 1 0 B に示す。

いずれの安定度測定も、 直流標準電圧発生器として John Fluke 製の 335D 型を用い、 電源の定格電流を通電して、 冷却水温度 3 0 °C で実施した。測定は 8 h 継続したが、 図では最初から 4 h までの部分について掲げ、 安定度の数値もこれらの範囲内で算出した。電圧の測定レンジは 1 0 0 μ V とし、 記録計のチャート速度は 6 cm/h で記録した。Fig. 1 0 A で示したように、 C M M の負荷電流は測定開始後いったんわずかに減少するが、 約 1 h 後には再び上昇に転じて徐々に増加している。これに対して、 Fig. 1 0 B においては、 測定開始後 4 h の範囲で I B M の負荷電流はゆるやかに上昇し、 一方 I I M ではこれとは逆にゆるやかに減少しているが、 いずれも単調な変化を示している。これらの電源の測定結果は、 いずれも時間経過に対して緩やかな変化に終始しており、 またそれらの変動量の相対値も約 $4 \sim 8 \times 10^{-6}$ と見積もられるので、 性能仕様値 $\pm 1 \times 10^{-5}$ の 2 0 ~ 4 0 % 程度に抑えられていることが分かる。

B リップル測定

リップルの測定は電流安定度の測定と同様、 電源には定格電流を通電し、 オシロスコープを用いて電源盤出力端子両端で測定を行った。電流リップル R_i の数値は、 測定したリップル電圧 E_R の値から、 次式により換算して評価した。

$$R_i = \frac{E_R}{I_0 \cdot \{ R_L^2 + (2\pi f L)^2 \}^{0.5}} \quad (1)$$

ここで R_L は負荷抵抗 (Ω) 、 L は負荷インダクタンス (H) であり、 さらに f は電源周波数 (50 Hz) 、 I_0 は負荷電流 (A) である。

C M M 用の C Y C _ P O W _ 1 0 について、 ディジタルオシロスコープ (Tektronix TDS 640 型) で測定した電圧リップルの波形を Photo. 3 に示す。最大負荷電流 $I_0 = 900$ A 通電 (電源出力電圧は 261.5 V) 時に測定された電圧リップルは、 周波数 50 Hz の三角波状の波形であり、 A C 電圧の数値が 120 mV (peak-to-peak) であった。この時の負荷インピーダンスは、 それぞれ $R_L = 0.278$ と $L = 0.37$ であるので、 これらの数値から電流リップル I_R は 1.1×10^{-6} と算出される。したがってこの電流リップルの数値 1.1×10^{-6} は、 仕様値 $\pm 1 \times 10^{-5}$ に比べて約 1/90 であり、 極めて良好な性能が得られた。

C 測定結果のまとめ

サイクロトロン本体系とイオン入射系の電源の安定度および電流リップルの測定結果の一例を、 Table 4 に示す。これらのうち C Y C _ P O W _ 2 0 、 C Y C _ P O W _ 3 0 および C Y C _ P O W _ 5 0 の 3 台の電源は、 いずれも電源安定度 $\pm 1 \times 10^{-4}$ のものであり、 その他は $\pm 1 \times 10^{-5}$ の高安定度仕様のものである。

測定された負荷抵抗については、 C C C 1 ~ 8 が 100 m Ω 以下であるのにに対して、 それ以外は数 100 m Ω 、 インダクタンスについても、 C C C が 35

$0 \mu H$ 以下であるのに対して、CGL1～4は $0.5 \sim 1.25 mH$ 、CMMは $0.37 H$ 、TAMは $1.7 H$ 程度の大きな数値を示した。またリップル電圧の測定値は、CCCで $4 \sim 17 mV$ 程度、CGLで $13 \sim 48 mV$ であったが、TAMでは $50 mV$ 、CMMでは $120 mV$ と比較的大きな値となった。

しかしながら比較的大きなリップル電圧を示しているCMMあるいはTAMについては、前述の換算式からも明らかのように負荷のインダクタンス値も大きいため、電流リップルへの寄与が相対的に小さくなり、その数値は大きくはならない。これらの結果、電流リップルおよび電源安定度の測定値は、両者とも十分仕様値を満足していることが確かめられた。

3. 2. 5 電源の共用化

前述のように特にビーム輸送系では、4極電磁石、ステアリング電磁石および偏向電磁石など同じ性能の機器が多数配置されている。しかし実際のビーム輸送やイオン室での照射利用などの場合には、常時1つのビームコースが選択されて使用されるに過ぎない。このためサイクロトロン以降のTSMまでの基幹ビームコースを除いた範囲に対して、ケーブル分配室に負荷切替盤を設置して電源の共用化を計り、電源盤の数量を減ずる合理設計を行うとともにそれらの利用効率も向上させた。

電源の共用化の例を、Fig. 11に示す。ビーム輸送系電源のBT-PO-W-40および50は、それぞれ7台のステアリング電磁石および6台の偏向電磁石を切り替えて動作させるため、負荷切替盤BT-LS-10およびBT-LS-20により、それぞれ負荷の電磁石1台を選択して使用する回路となっている。なお負荷の切り替えについては、オペレーターが操作時に共用電源と負荷電磁石との相関関係を個別に認識する必要はなく、ビームコースの選択時に制御室から遠隔で自動的にシーケンス制御される。

負荷切替盤BT-LS-10の背面内部の状態をPhoto. 4に示す。この切替盤では、Fig. 11に示したように共用のステアリング電磁石TST-LD～TSTD 7台と、単独使用のTSTHE 1台の合計8台分が切り換え（あるいは使用）の対象となる。これらのSTは、さらにそれぞれが水平（X）方向および垂直（Y）方向偏向用の1組の電磁石から構成されており、したがって負荷の切り換えは合計16台について必要となる。負荷切替盤BT-LS-10では、これら16台のSTに対応した電磁接触器（Magnetic contactor、定格200A）16ヶが配置されている。これらの電磁接触器は、高田製作所製のTGM-C型であり、定格電圧はAC 500V、DC 140Vであり、定格電流は負荷電流に応じて200A、250A、300Aおよび400Aなどの容量のものが使用されている。

Table 1A 415V系電源系統負荷内容および電流測定結果 (1/4)

系 統	ブレーカー記号	電流容量	電流測定値	負 荷 内 容 等
		A	A	
サイクロ本体系	MCB 111	500	410.0	メインコイル (CMM)
	MCB 112	200	172.0	マグネティックチャンネル (CMC)
	MCB 113	125	27.6	C1~C8コイル(CCC1-CCC8)
	MCB 114	150	76.2	C9~C12コイル&HI&HEコイル
	MCB 115	75	21.5	ゲーレーザー&ステアリングコイル(CGL&CST)
	MCB 116	125	35.5	TQ & STコイル(CTQ&CST)
	MCB 117	250	89.9	RF(CPLM_1&CPLM_2)
ビーム輸送系	MCB 119	125	49.6	分析電磁石 (TAM)
	MCB 120	100	39.6	分析電磁石 (TAMHE)
	MCB 121	200	16.8	スイッチング電磁石 (TSM)
	MCB 122	125	3.8	ステアリング(TST&TST**&TSTHE)
	MCB 123	250	0.7	偏向電磁石(TBM**&TBML)
	MCB 124	150	83.9	4極電磁石(TDQ1&TDQ2&TTQ)
	MCB 125	150	24.2	4極電磁石(TDQ**1&2&TSQ)
	MCB 126	150	43.5	4極電磁石(TTQ**1&TTQ2&TSQ2)
	MCB 127	150	42.7	4極電磁石(TDQ**4&5&TTQ**2)
系統全体での測定電流積算値			1138.0	
基幹受電系統の電流測定値			1100.0	ケーブルNo. 41C-101

測定器 : HIOKI製

DIGITAL CLAMP ON Hi TESTER

Type : 3261

NORMAL MODE 使用

サイクロトロン装置の運転状態

イオン源 : ECRイオン源

加速粒子およびエネルギー : $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 、460 MeV

使用ビームポート : HE 2 (第4重イオン室)

Table 1B 200V系電源系統負荷内容および電流測定結果(2/4)

系統	ブレーカー記号	電流容量	電流測定値	負荷内容等
		A	A	
サイクロ本体系	MCB 211	50	1. 1	P型チョッパー(CYC_POW_80)
	MCB 212	30	0. 3	ヨークリフト用電源
	MCB 213	30	1. 1	デフレクター(CYC_CNT_9)
	MCB 214	30	1. 4	インフレクター(CYC_CNY_9)
	MCB 215	150	52. 0	真空排気系(CYC_CNT_8)
	MCB 216	75	24. 5	R F補助電源(CYC_POW_80)
	MCB 217	30	4. 3	インフレクター自動化(CIF, CPU)
	MCB 218	30	0. 3	プラ-自動化(CIF, CPU_CNT_1)
	MCB 219	30	0. 2	デフレクター自動化
	MCB 220	30	9. 6	マグチャン用チラーユニット
ビーム輸送系	MCB 222	150	0. 1	S型チョッパー電源
	MCB 223	300	19. 9	配線スペース室分電盤(BT_LS)
	MCB 224	75	5. 8	第1軽イオン室分電盤(BSLX等)
	MCB 225	150	4. 7	第3軽イオン室分電盤(BSLD等)
	MCB 226	150	8. 7	第1重イオン室分電盤(BSHY等)
	MCB 227	50	12. 0	第3重イオン室分電盤(TSHC等)
	MCB 228	50	2. 0	第4重イオン室分電盤(TSHE2)
系統全体での測定電流積算値			148. 0	
基幹受電系統の電流測定値			130. 0	ケーブルNo. 21C-101
純水冷却系	MCB 1	100	40. 8	イオン入射系循環ポンプ等(52A)
	MCB 2	300	123. 0	サイクロトロン系循環ポンプ(154A)
	MCB 3	400	188. 0	ビーム輸送系循環ポンプ(184A)
	MCB 4	30	10. 4	真空ポンプ系(13A)
	MCB 5	50	22. 0	真空ポンプ系チラー(21A)
系統全体での測定電流積算値			384. 2	
基幹受電系統の電流測定値			---	バスダクトのため測定不能

Table 1C 200V系電源系統負荷内容および電流測定結果(3/4)

系統	ブレーカー記号	電流容量	電流測定値	負荷内容等
		A	A	
イオン源系	MCB 311	30	20.7	No. 1ミラー・コイル(24V/200A)
&	MCB 312	20	10.8	No. 2ミラー・コイル(12V/200A)
入射系	MCB 313	200	77.1	No. 3ミラー・コイル(75V/500A)
	MCB 314	200	77.5	No. 4ミラー・コイル(75V/500A)
	MCB 315	100	22.0	ECRケーブル・レンズ(70V/320A)
	MCB 316	40	35.1	ECR第1ステージμ波(40A)
	MCB 317	40	32.4	ECR第2ステージμ波(40A)
	MCB 318	30	1.5	I B A_C N T_1 (20A)
	MCB 319	30	6.1	分析電磁石(24V/125A)
	MCB 320	10	0.0	マルチカスプローフィラメント電源(10V/100A)
	MCB 321	50	0.0	マルチカスプローフーアーク電源(300V/15A)
	MCB 322	10	0.0	マルチカスプローフステアリング電源(10V/1A)
	MCB 323	30	0.0	I B A_C N T_2 (20A)
	MCB 324	500	112.0	入射系ソレノイドレンズ
	MCB 325	20	3.2	入射系ステアリング電磁石
	MCB 326	30	7.2	インフレクション&ベンディング電磁石
	MCB 327	75	30.9	ECR_CNT_4(70A)(真空排気系)
	MCB 328	30	2.7	CUSP_CNT_1(30A)(真空排気系)
	MCB 329	30	11.2	INJ_CNT_3(30A)(真空排気系)
	MCB 330	100	0.0	マルチカスプローフケーブル・レンズ(40V/200A)
	MCB 331	30	9.7	ECR用チラーユニット(30A)
系統全体での測定電流積算値			460.1	
基幹受電系統の電流測定値			---	バスダクトのため測定不能

Table 1D 100V系電源系統負荷内容および電流測定結果 (4/4)

系 統	ブレーカー記号	電流容量	電流測定値	負 荷 内 容 等
		A	A	
サイロ本体系	ELB 511	100	13. 0	CYC_CNT_1~3
	ELB 512	50	13. 6	CYC_CNT_5~6&BCP_CNT_1
	ELB 513	50	5. 9	CYC_CNT_4, 9, 10
	ELB 514	30	8. 7	OPT_CNT_1 (20A)
	ELB 515	50	0. 0	CYC_CNT_11(20A)
	ELB 516	100	18. 8	BT_CNT_1~3(90A)
	ELB 517	100	15. 6	BT_CNT_4~7(90A)
	ELB 518	50	14. 7	BT_CNT_8~10(45A)
	ELB 519	100	15. 7	BT_CNT_11~17(105A)
	ELB 521	30	1. 3	BT_CNT_27 (5A)
系統全体での測定電流積算値			107. 3	
サイロ制御系	ELB 611	75	21. 7	コントロールコンソール&GCU (無停電電源)
	ELB 612	50	7. 7	コントロールコンソール&VAC_CNT_1(20A)
	ELB 613	30	12. 3	VAC_CNT_2&COOL_CNT_1等(30A)
イオン源系	ELB 711	20	4. 7	ECR_CNT_1 (20A)
	ELB 712	30	4. 7	ECR_CNT_2 (30A)
	ELB 713	20	2. 2	ECR_CNT_5 (30A)
	ELB 714	20	4. 7	CUSP_CNT_1(20A)
	ELB 715	20	6. 4	INJ_CNT_1 (20A)
	ELB 716	20	2. 4	INJ_CNT_3 (20A)
	ELB 717	20	2. 1	INJ_CNT_3 (20A)
	ELB 718	20	4. 4	シリダーキャビネット&ボンベスタンド等
系統全体での測定電流積算値			73. 3	
純水冷却系	MCB CO	30	1. 9	冷却系操作盤内制御用電源
	系統全体の電流		1. 8	ケーブルNo. 12C-105

Table 2 サイクロotron装置の系統別および機能別消費電力の内容

							Unit : kVA	
	Ion source	Injection	Cyclotron	Beam trans.	Control	Cooling	Total	Ratio(%)
Magnet	78.1	42.4	533.9	219.4			873.8	73.9
RF	23.4		64.6	0.0			88.0	7.4
Vacuum	11.6	3.9	18.0	10.4			43.9	3.7
Others	1.6	5.3	25.6	8.0			40.5	3.4
Control					4.2		4.2	0.4
Cooling						133.0	133.0	11.2
Total	114.7	51.6	642.1	237.8	4.2	133.0	1183.4	100.0
Ratio (%)	9.7	4.4	54.2	20.1	0.4	11.2	100.0	

Ion beam: $^{40}\text{Ar}^{13+}$, 460 MeV Target port: HE2

Table 3A 電源の構成内容および基本性能一覧表 (1/6)

電源名 負荷内容	負荷略号名	基 本 性 能					
		出力電流	出力電圧	電流安定度	電流リップル	特殊機能	備 考
		(A)	(V)	以 内	以 内		
ECR_POW_10	EAM	125	24.2	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	消磁機能付	ECRイオン源分析電磁石
INJ_POW_10 ソレノイド 電磁石	ISDE1	252	41.2	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}		
	ISDE2	↓	↓	↓	↓		
	ISDM1	↓	↓	↓	↓		
	ISD1	↓	↓	↓	↓		
	ISD2	↓	↓	↓	↓		
	ISD3	↓	↓	↓	↓		
	ISD4	↓	↓	↓	↓		
	ISD5	↓	↓	↓	↓		
INJ_POW_20 ステアリング 電磁石	ISTE1_X	7.5	13.4	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	極性切換付	
	ISTE1_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST1_X	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST1_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST2_X	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST2_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST3_X	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST3_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST4_X	↓	↓	↓	↓	↓	
	IST4_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
INJ_POW_30	IIM	90	18.4	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	極性切換付	インフレクション電磁石
偏向電磁石	IBM	47	26	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}		90度偏向電磁石

いずれの電源についても、設定分解能は16 bit、電流検出分解能および電圧検出分解能は12 bitである。

Table 3B 電源の構成内容および基本性能一覧表 (2/6)

電源名 負荷内容	負荷略号名	基 本 性 能					
		出力電流	出力電圧	電流安定度	電流リップル	特殊機能	備 考
		(A)	(V)	以 内	以 内		
CYC_POW_10	CMM	900	288.5	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}		メインコイル
CYC_POW_20	CMC	1300	69.6	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}		マグネティックチャンネル
CYC_POW_30 サーキュラートリムコイル	CCC1	600	8.3	$\pm 2 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	極性切換付	No. 1 トリムコイル
	CCC2	700	10.6	↓	↓	↓	No. 2 トリムコイル
	CCC3	300	7.7	↓	↓	↓	No. 3 トリムコイル
	CCC4	300	9.1	↓	↓	↓	No. 4 トリムコイル
	CCC5	150	7.5	↓	↓	↓	No. 5 トリムコイル
	CCC6	200	12.2	↓	↓	↓	No. 6 トリムコイル
	CCC7	200	12.9	↓	↓	↓	No. 7 トリムコイル
	CCC8	200	11.6	↓	↓	↓	No. 8 トリムコイル
CYC_POW_40 サーキュラートリムコイル および ハーモニックコイル	CCC9	300	13.0	$\pm 2 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	極性切換付	No. 9 トリムコイル
	CCCA	625	14.8	↓	↓	↓	No. 10 トリムコイル
	CCCB	800	27.9	↓	↓	↓	No. 11 トリムコイル
	CCCC	200	10.8	↓	↓	↓	No. 12 トリムコイル
	CHI_13	50	10.7	↓	↓	↓	入射ハーモニックコイル
	CHI_24	↓	↓	↓	↓	↓	入射ハーモニックコイル
	CHE_13	50	23.1	↓	↓	↓	引出ハーモニックコイル
	CHE_24	↓	↓	↓	↓	↓	引出ハーモニックコイル

いずれの電源についても、設定分解能は16 bit、電流検出分解能および電圧検出分解能は12 bitである。

Table 3C 電源の構成内容および基本性能一覧表 (3/6)

電源名 負荷内容	負荷略号名	基本性能					
		出力電流 (A)	出力電圧 (V)	電流安定度 以内	電流リップル 以内	特殊機能	備考
CYC_POW_50 グレーザー ^{レズ} およびステアリング電磁石	CGL1	200	20.9	$\pm 2 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}		No. 1グレーザーレズ
	CGL2	↓	↓	↓	↓		No. 2グレーザーレズ
	CGL3	250	25.9	↓	↓		No. 3グレーザーレズ
	CGL4	420	23.2	↓	↓		No. 4グレーザーレズ
	CSTI_X	10	31.1	↓	↓	極性切換付	垂直入射部取扱(X)
	CSTI_Y	↓	↓	↓	↓	↓	垂直入射部取扱(Y)
CYC_POW_60 4極電磁石およびステアリング電磁石	CTQ_1	213	37	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}		
	CTQ_2	↓	↓	↓	↓		
	CTQ_3	↓	↓	↓	↓		
	CSTE_X	545	15	↓	↓	↓	
	CSTE_Y	406	6	↓	↓	↓	
CYC_POW_70	CPLM	12	12000	非安定			メインアンププレート
CYC_POW_80 RF電源	CCGP	50 mA	-100	$\pm 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}		プリアンプコントローラグリッド
	CSGP	120 mA	400	↓	↓		プリアンプスクリーニンググリッド
	CPLP	1.2	2600	非安定			プリアンププレート
	CCGM	200 mA	-500	$\pm 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}		メインアンプコントローラグリッド
	CSGM	1.0	1500	↓	↓		メインアンプスクリーニンググリッド
CYC_POW_90 高圧電源	CDFV	2.5 mA	-80 kV	0.05%+5V	0.02%+2V		デフレクター電圧
	CIFV_P	1 mA	-10 kV	0.05%+5V	0.02%+2V		インフレクター正電圧
	CIFV_M	1 mA	10 kV	0.05%+5V	0.02%+2V		インフレクター負電圧

CYC_POW_70およびCYC_POW_80のRF電源を除く電源については、設定分解能は16 bit、電流検出分解能および電圧検出分解能は12 bitである。

Table 3D 電源の構成内容および基本性能一覧表 (4/6)

電源名 負荷内容	負荷略号名	基本性能					
		出力電流 (A)	出力電圧 (V)	電流安定度 以内	電流リップル 以内	特殊機能	備考
BT_POW_10	TAM	290	160	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	消磁機能付	80度分解能石
BT_POW_20	TAMHE	290	125	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	消磁機能付	55度分解能石
BT_POW_30	TSM	525	155	$\pm 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	極性切換付	スイッチング電磁石
	TST1_X	190	35	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	極性切換付	
	TST1_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
BT_POW_40	TSTHE1_X	↓	↓	↓	↓	↓	
ステアリング電磁石	TSTHE1_Y	↓	↓	↓	↓	↓	
	TST**_X	↓	↓	↓	↓	↓	共用電源 BT_LS_10 (TSTLB_X, TSTLC_X, TSTLD_X, TSTHA_X, TSTHB_X, TSTHC_X, TSTHD_X)
	TST**_Y	↓	↓	↓	↓	↓	共用電源 BT_LS_10 (TSTLB_Y, TSTLC_Y, TSTLD_Y, TSTHA_Y, TSTHB_Y, TSTHC_Y, TSTHD_Y)
BT_POW_50	TBM**	325	205	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	消磁機能付	共用電源 BT_LS_20 (TBMLX1, TBMLE, TBMHX, TBMHY, TBMHZ, TBMLC_CM)
偏航電磁石	TBMLX2	280	150	↓	↓	↓	

これらの電源についても、設定分辨率は16bit、電流输出分辨率および電压输出分辨率は12bitである。

Table 3E 電源の構成内容および基本性能一覧表 (5/6)

電 源 名 負荷容量	負荷番号名	基 本 性 能				備 考
		出力電流 (A)	出力電圧 (V)	電流定度 $\pm 1 \times 10^{-4}$	電流リップル 1×10^{-3}	
BT_POW_60 4極電磁石	TDQ1_1	213	37	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	
	TDQ1_2	↓	↓	↓	↓	
	TDQ2_1	↓	↓	↓	↓	
	TDQ2_2	↓	↓	↓	↓	
	TTQ1_1	↓	↓	↓	↓	
	TTQ1_2	↓	↓	↓	↓	
	TTQ1_3	↓	↓	↓	↓	
	TDQ**1_1	213	37	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	恒生切換付
	TDQ**1_2	↓	↓	↓	↓	恒生切換付
	TDQ**2_1	↓	↓	↓	↓	恒生切換付
BT_POW_70 4極電磁石	TDQ**2_2	↓	↓	↓	↓	恒生切換付
	TDQ**3_1	↓	↓	↓	↓	恒生切換付
	TDQ**3_2	↓	↓	↓	↓	恒生切換付
	TSQ**1	↓	↓	↓	↓	恒生切換付
	TSQ**2	↓	↓	↓	↓	恒生切換付

いずれの電源についても、設定分辨率は16bit、電流输出分辨率および電压输出分辨率は12bitである。

Table 3F 電源の構成内容および基本性能一覧表 (6/6)

電源名 負荷内容	負荷略号名	基 本 性 能					備 考
		出力電流 (A)	出力電圧 (V)	電流定度	電流リップル	特種機能	
BT_POW_80	TTQ2_1	213	37	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	極性切換付	
	TTQ2_2	↓	↓	↓	↓	↓	
	TTQ2_3	↓	↓	↓	↓	↓	
	TSQ2	↓	↓	↓	↓		
4極電磁石	TTQ**1_1	↓	↓	↓	↓	極性切換付	共用電源 BT_LS_40 (TTQLB1_1, TTQLC1_1, TTQLD1_1, TTQHD1_1)
	TTQ**1_2	↓	↓	↓	↓	極性切換付	↓ TTQHA1_2, TTQHB1_2, TTQLC1_2, TTQHD1_2)
	TTQ**1_3	↓	↓	↓	↓	極性切換付	↓ TTQHA1_3, TTQHB1_3, TTQLC1_3, TTQHD1_3)
	TDQ**4_1	213	37	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}		共用電源 BT_LS_50 (TDQLB1_1, TDQLC1_1, TDQLD1_1,
	TDQ**4_2	↓	↓	↓	↓		TDQHC1_1, TDQHD1_1)
	TDQ**5_1	↓	↓	↓	↓		↓ (TDQLB1_2, TDQLC1_2, TDQLD1_2,
BT_POW_90	TDQ**5_2	↓	↓	↓	↓		TDQHC1_2)
4極電磁石	TTQ**2_1	↓	↓	↓	↓	極性切換付	共用電源 BT_LS_50 (TDQLB2_1, TDQLC2_1, TDQHC3_1,
	TTQ**2_2	↓	↓	↓	↓	極性切換付	TDQHD2_1)
	TTQ**2_3	↓	↓	↓	↓	極性切換付	↓ TTQLB2_2, TTQHB2_2, TTQLC2_2, TTQHD2_2)
							↓ TTQHA2_3, TTQLB2_3, TTQLC2_3, TTQHD2_3)

いずれの電源についても、設定分辨率は16bit、電流対出力分辨率は12bitである。

Table 4 電源の電流リップルおよび安定度測定結果の一例

電 源 略 号 名	負 荷 略号名	負荷抵抗 $\text{m}\Omega$	負荷イダクタス μH	リップル電圧 mV	端子電圧 V	負荷電流 A	電流リップル	電流安定度	備 考
CYC_POW_10	CMM	292	0.37(H)	120	261.5	900	1.1 × 10 ⁻⁶	5.8 × 10 ⁻⁶	リップル仕様値 1.0 × 10 ⁻⁴
CYC_POW_20	CMC	51.5		5	67.0	1300			1.0 × 10 ⁻³
	CCC1	21.4	24.4	17	12.9				↓
	CCC2	22.6	51.0	16	15.9	700	8.2 × 10 ⁻⁴		↓
	CCC3	28.5	77.2	5	8.6	300	4.5 × 10 ⁻⁴		↓
	CCC4	32.7	142	4	9.8	300	2.4 × 10 ⁻⁴		↓
	CCC5	44.3	238	7	6.7	150	5.4 × 10 ⁻⁴		↓
	CCC6	40.8	239	8	8.2	200	4.7 × 10 ⁻⁴		↓
	CCC7	41.3	292	9	8.3	200	4.5 × 10 ⁻⁴		↓
	CCC8	44.3	340	8	8.9	200	3.5 × 10 ⁻⁴		↓
	CGL1	82.5	1245	24	16.5	200	3.0 × 10 ⁻⁴		↓
	CGL2	83.0	1232	13	16.6	200	1.5 × 10 ⁻⁴		↓
	CGL3	87.2	563	20	21.8	250	4.1 × 10 ⁻⁴		↓
	CGL4	45.0	488	48	18.9	420	7.2 × 10 ⁻⁴		↓
	INJ_POW_10	1BM	426	8	20.0	47		7.5 × 10 ⁻⁶	1.0 × 10 ⁻⁴
		1IM	151		9	13.6	90	3.6 × 10 ⁻⁶	↓
	BT_POW_10	TAM	436	1.66(H)	50	126.5	290	3.3 × 10 ⁻⁷	7.4 × 10 ⁻⁶

電流のリップルは、電源周波数の50Hz成分である。安定度は、冷却水温度30°Cで測定された4時間当たりの数値である。また電流安定度の仕様値は、CM_M、1BM、1IMおよびTAMの4台について、いずれも±1.0 × 10⁻⁶であり、それ以外については±2.0 × 10⁻⁴となっている。

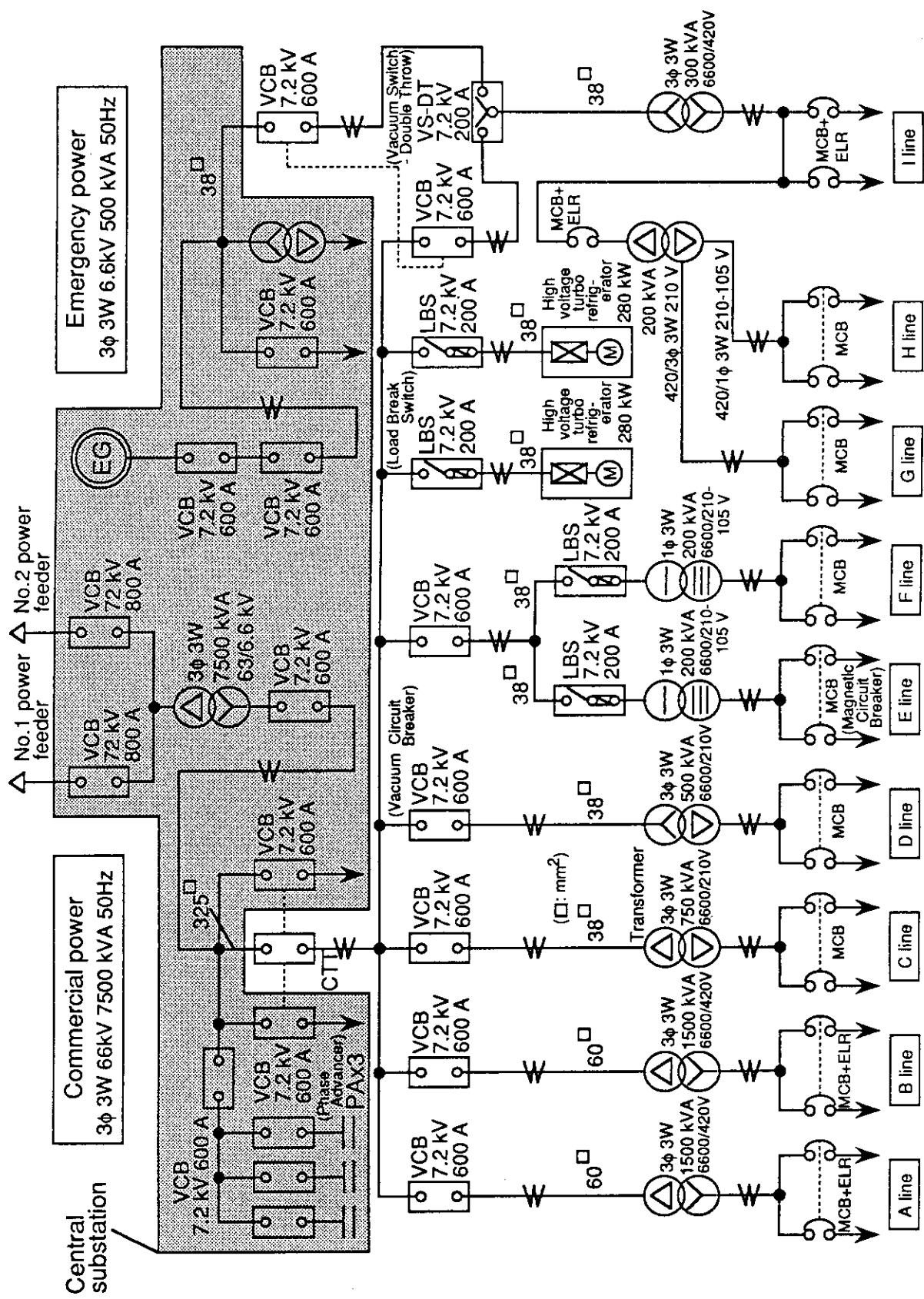


Fig. 2 イオン照射研究施設受電系統幹線接続図

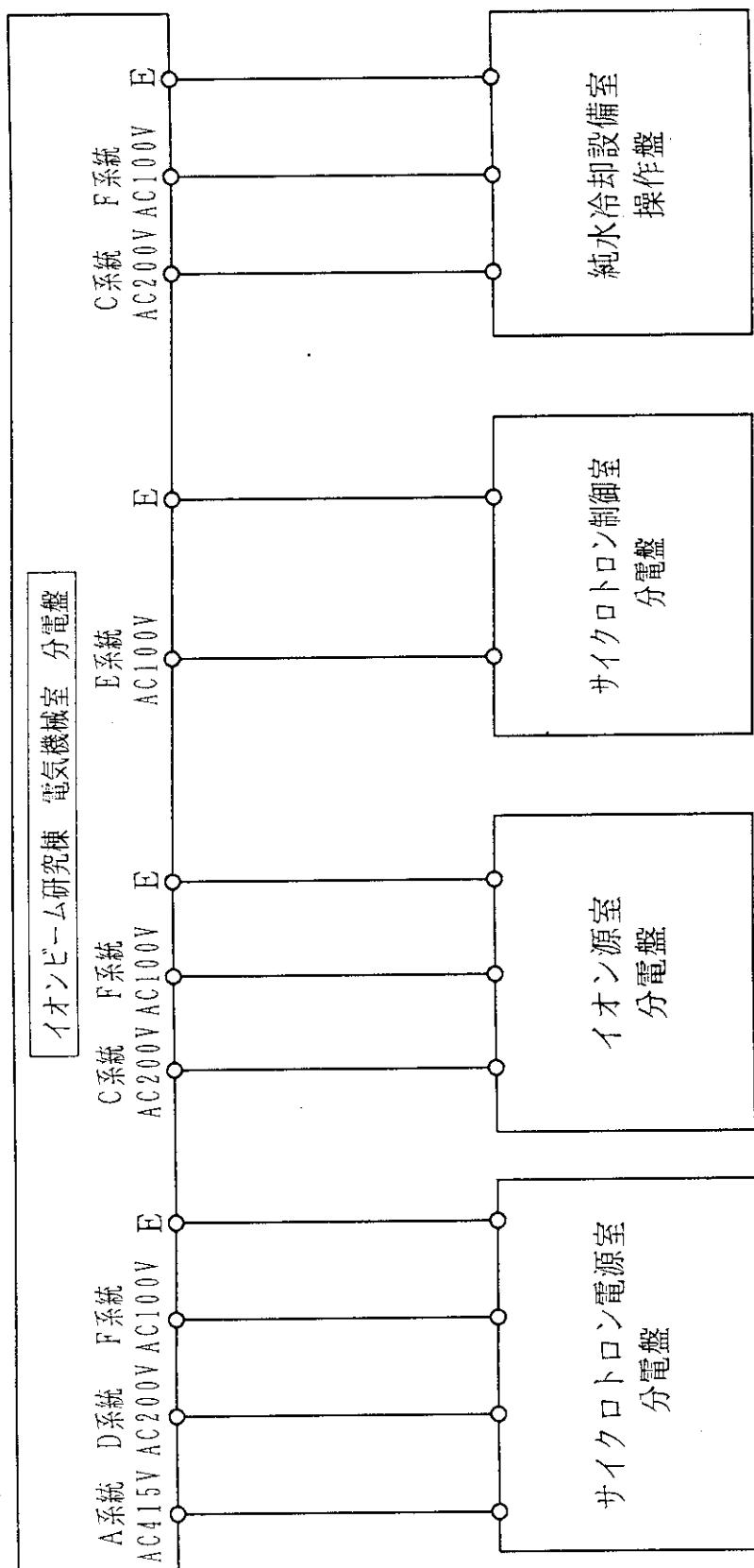


Fig. 3 サイクロトロン装置の幹線受電系統概略図

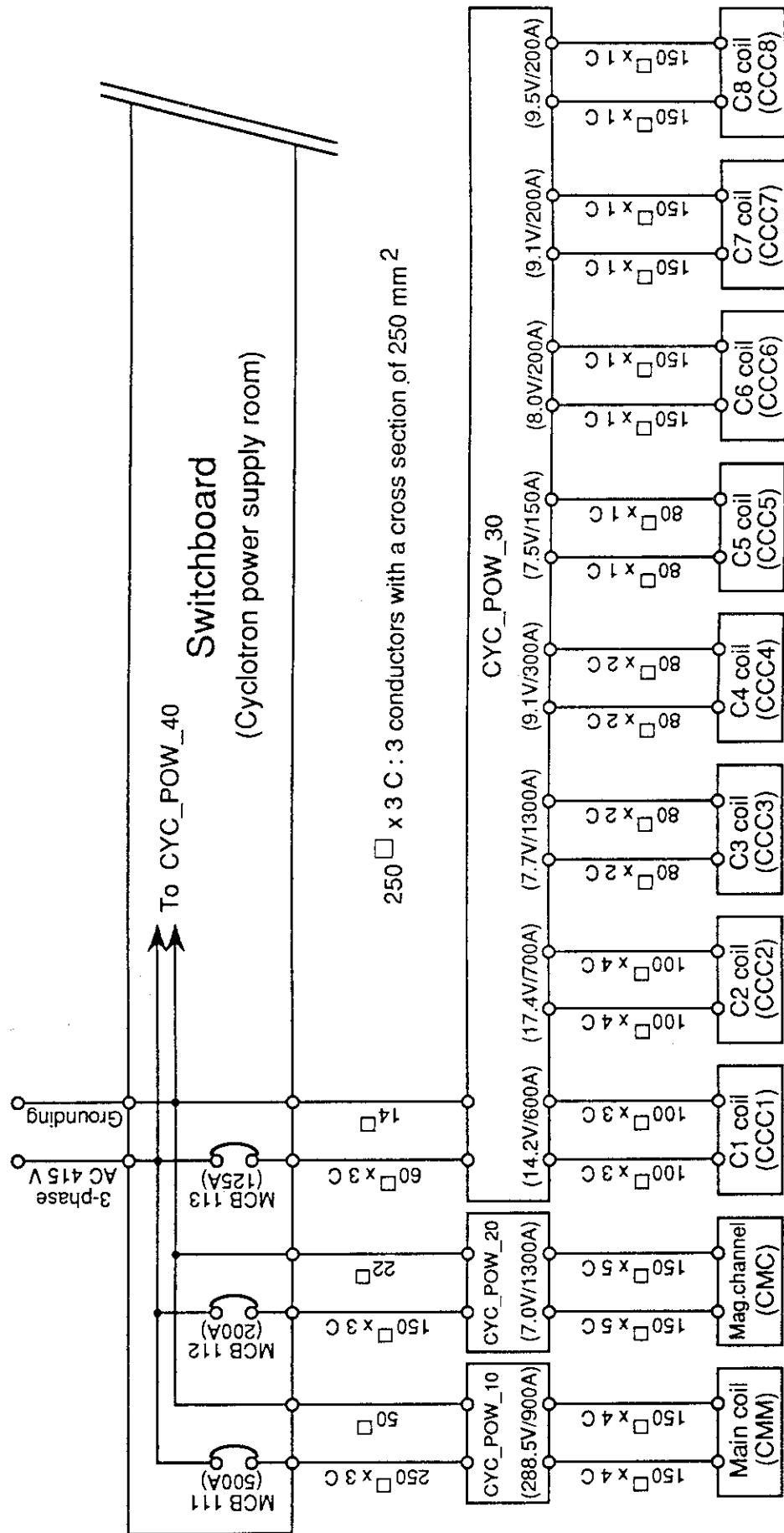


Fig. 4A サイクロトロン本体415V系電源系統図（サイクロトロン電源室）

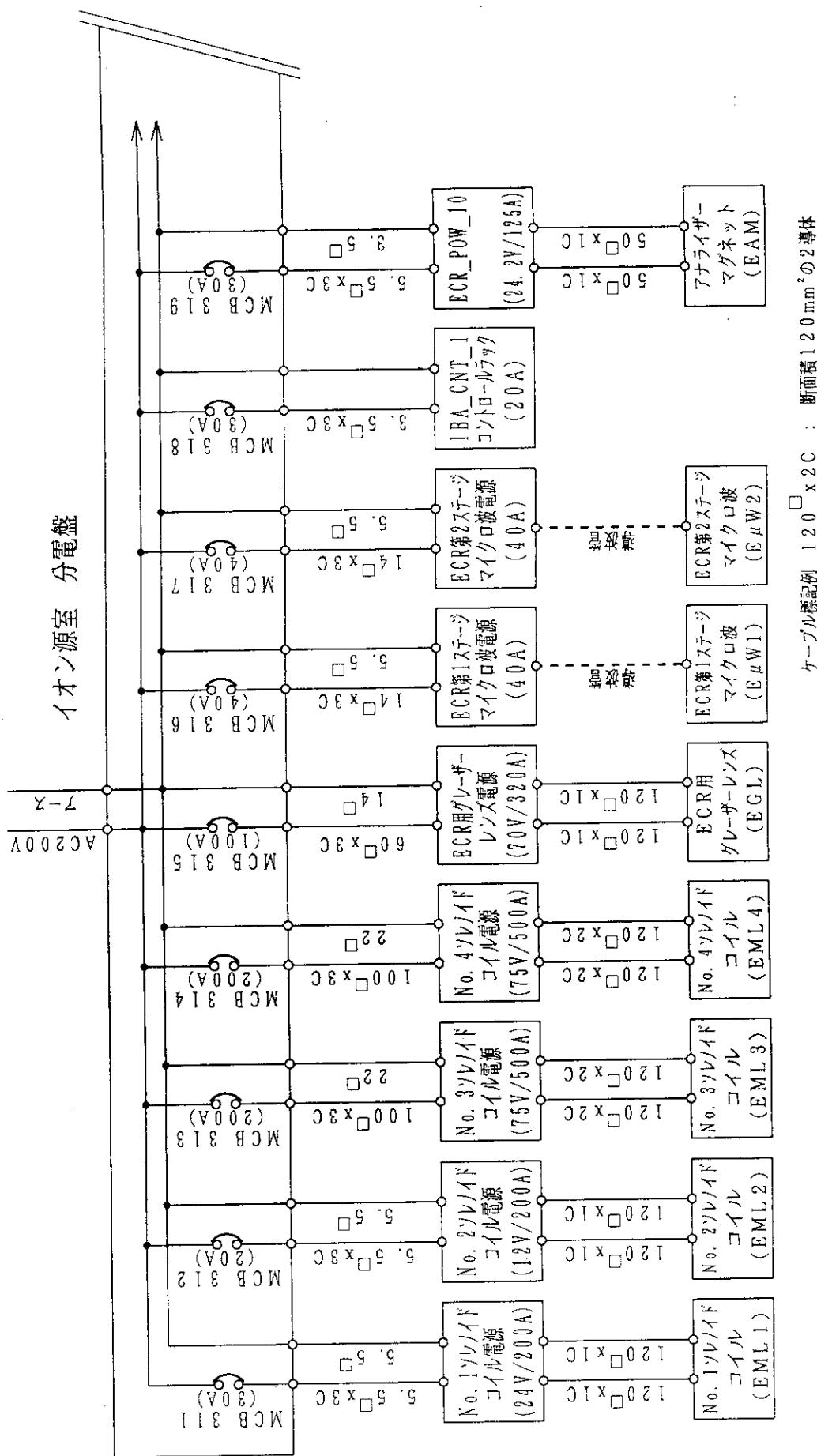
ケーブル標記例 120 □ x 2C : 断面積120 mm²の2導体

Fig. 4B ECR イオン源200V 電源系統図 (イオン源室)

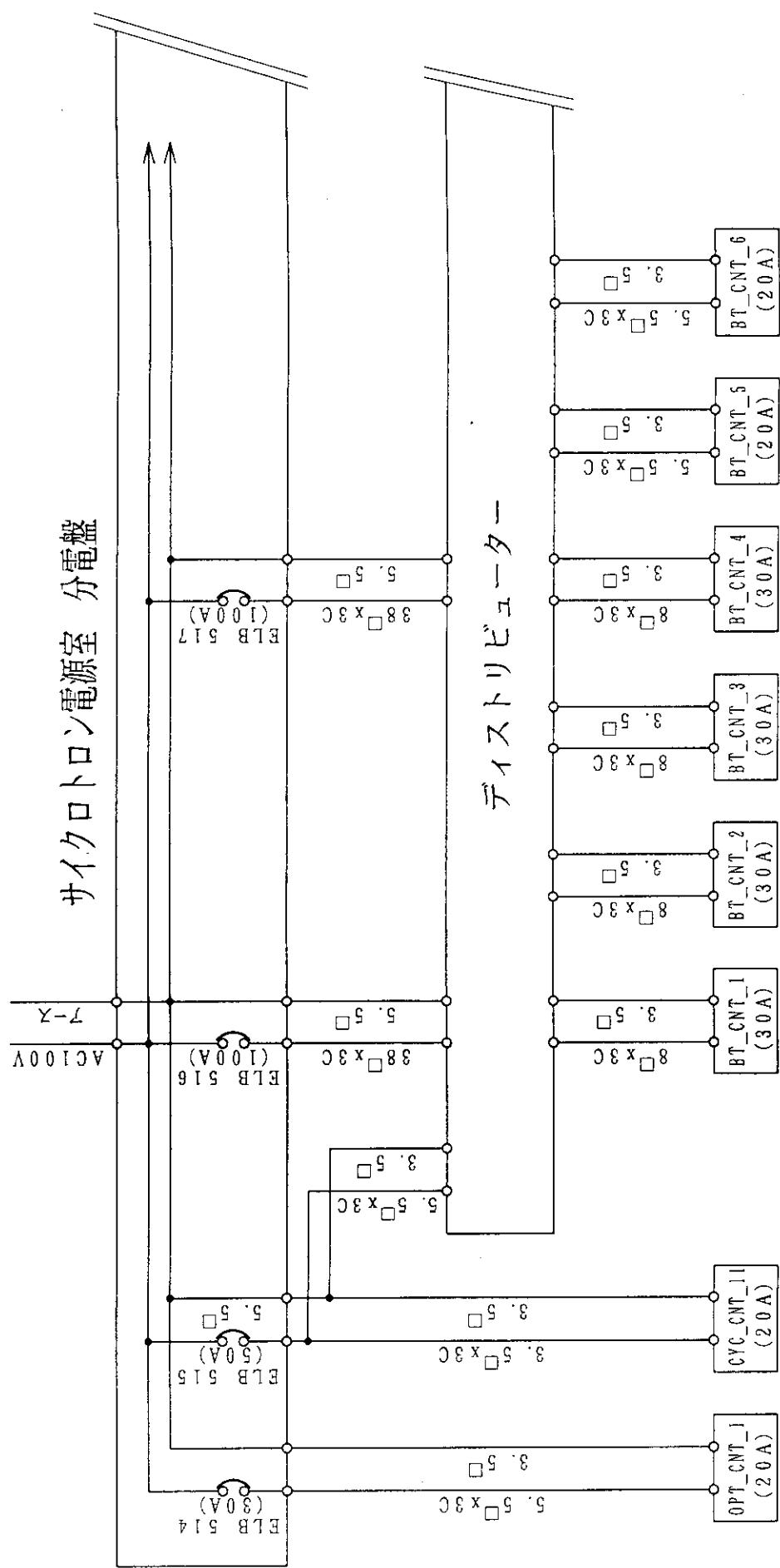


Fig. 4C サイクロトロン本体 100V 系電源系統図 (サイクロトロン電源室)

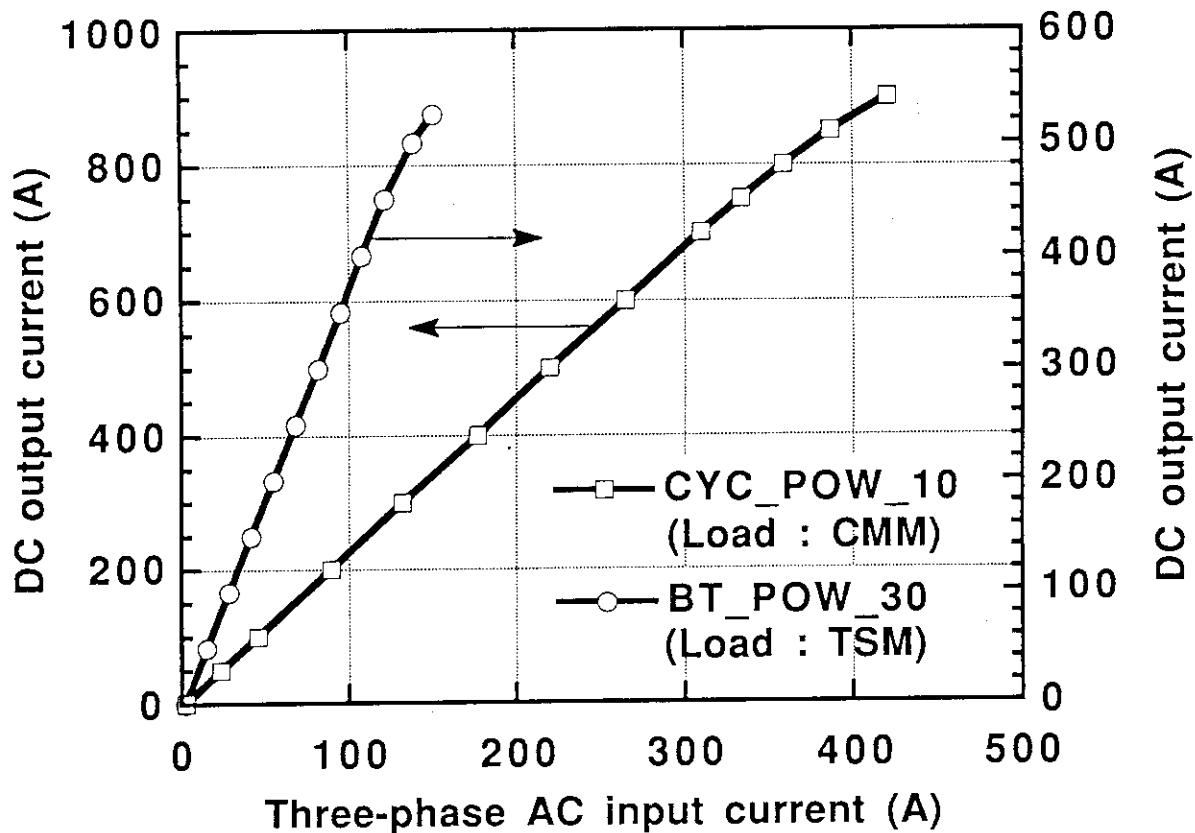


Fig. 5 電磁石電源の3相交流入力電流と直流出力電流との関係

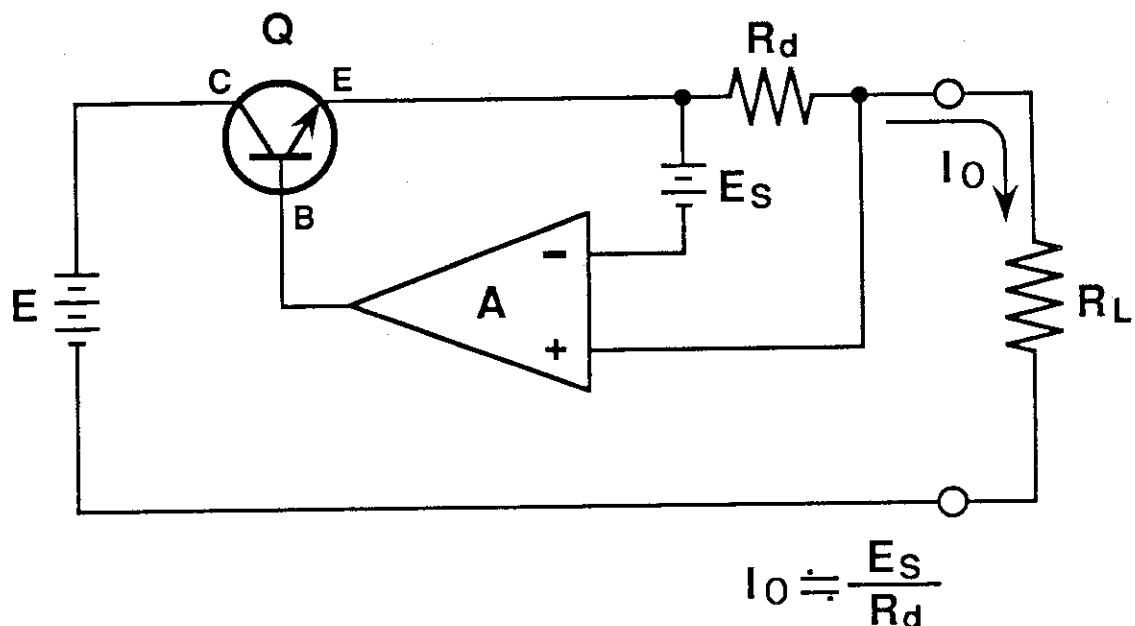


Fig. 6 定電流電源回路基本図の一例

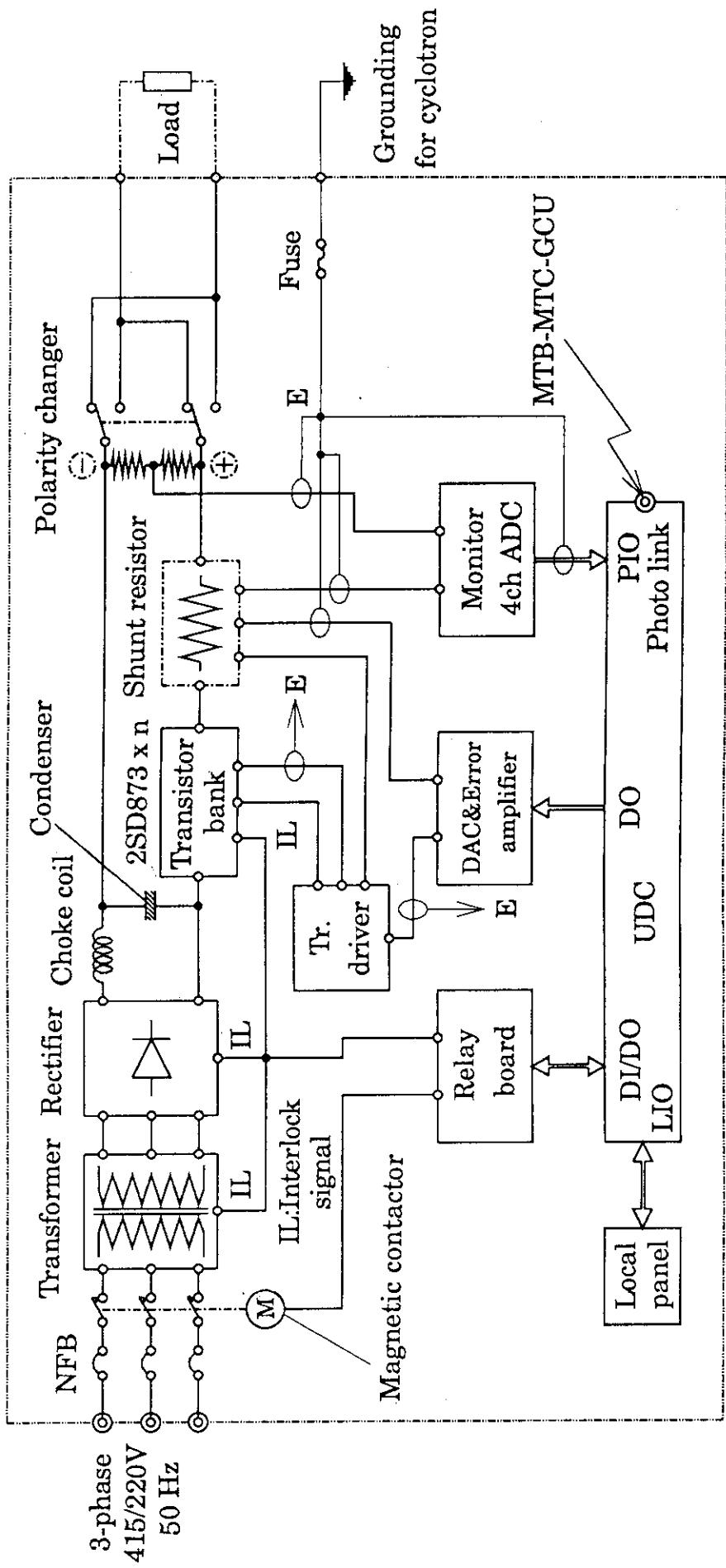


Fig. 7 電磁石用電源回路の基本構成図

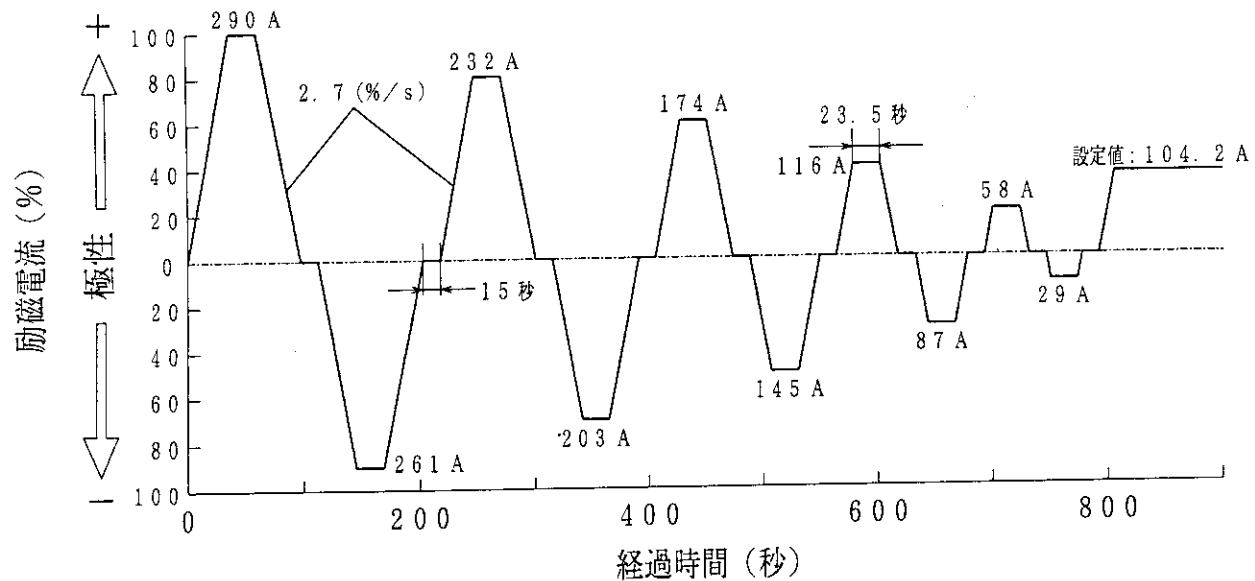


Fig. 8 電磁石消磁プロファイルの一例 (TAM)

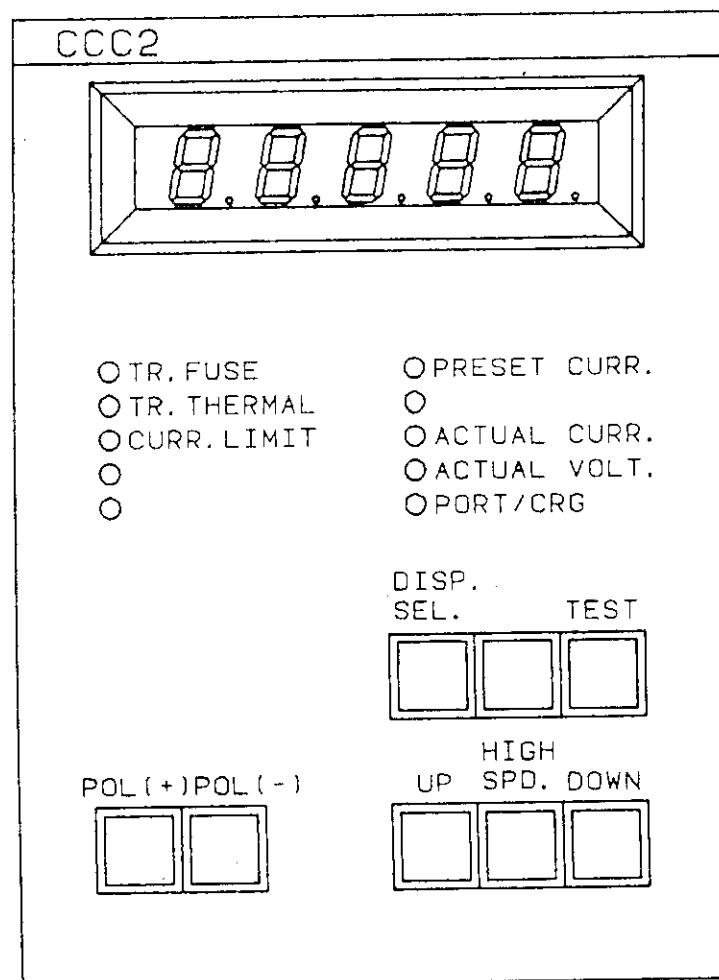


Fig. 9 電源盤ローカルパネルの一例 (CCC2 の場合)

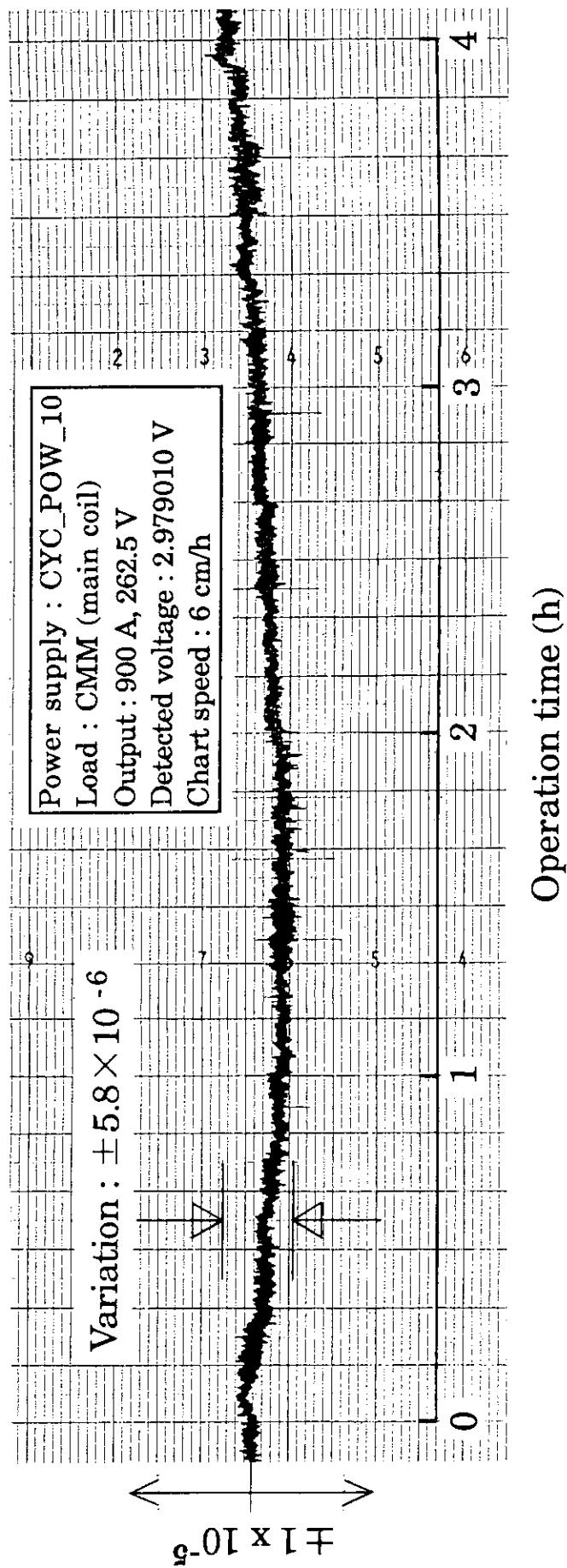


Fig. 10A 電磁石用電源 (CYC_POW_10) の安定度測定結果

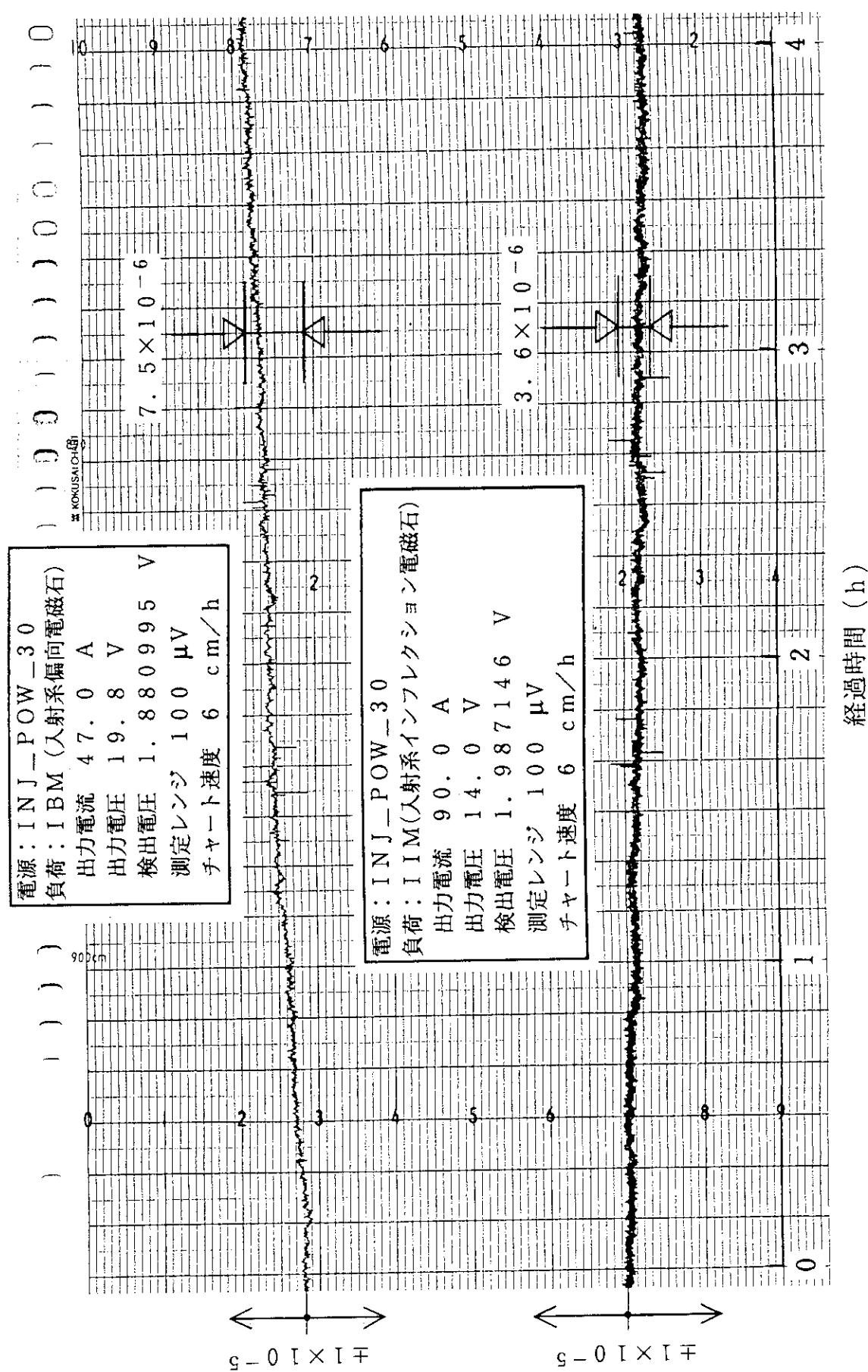


Fig. 10B 電磁石用電源 (CYC_POW_30) の安定度測定結果

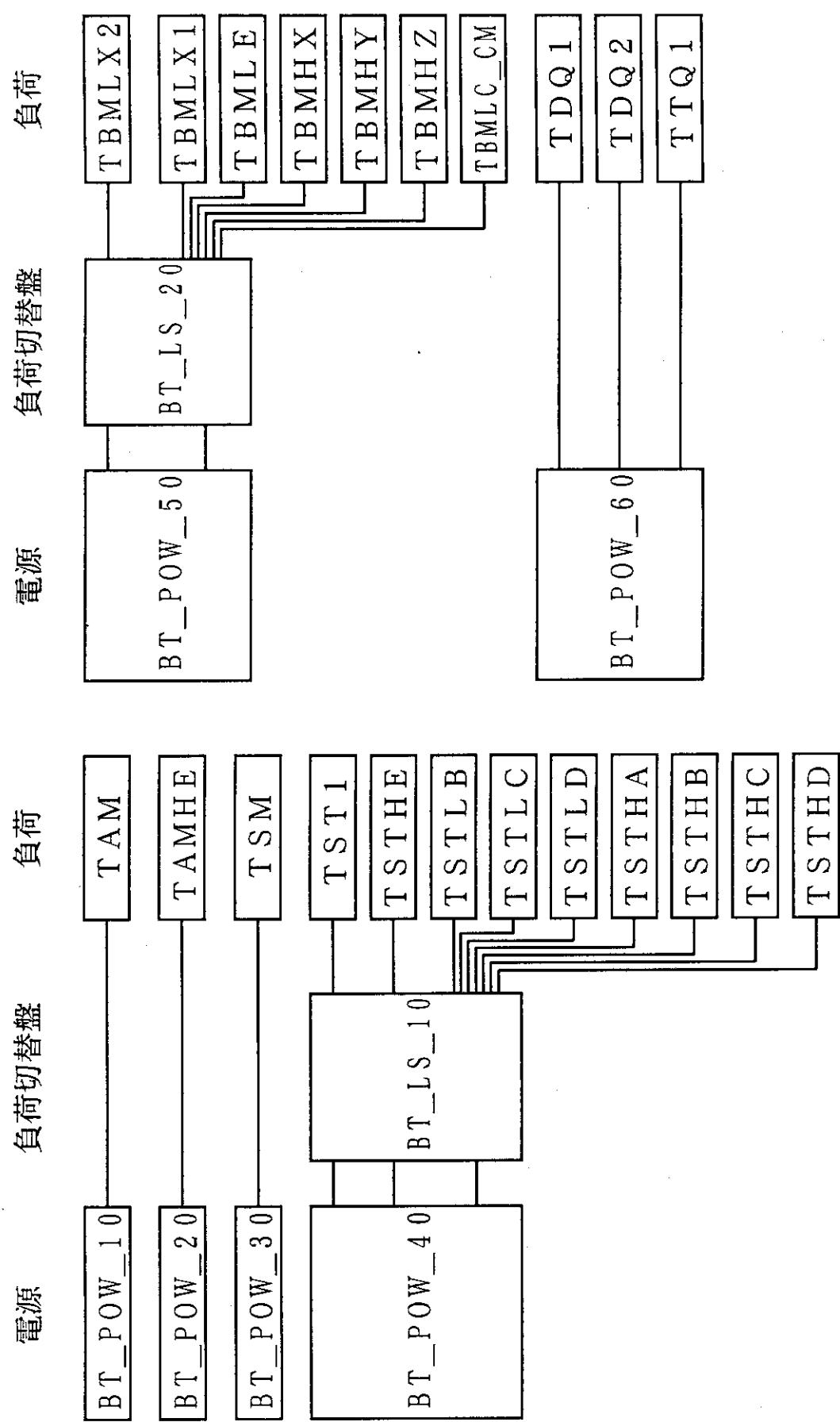


Fig. 11 ビーム輸送系共用電源および負荷構成内容の一例

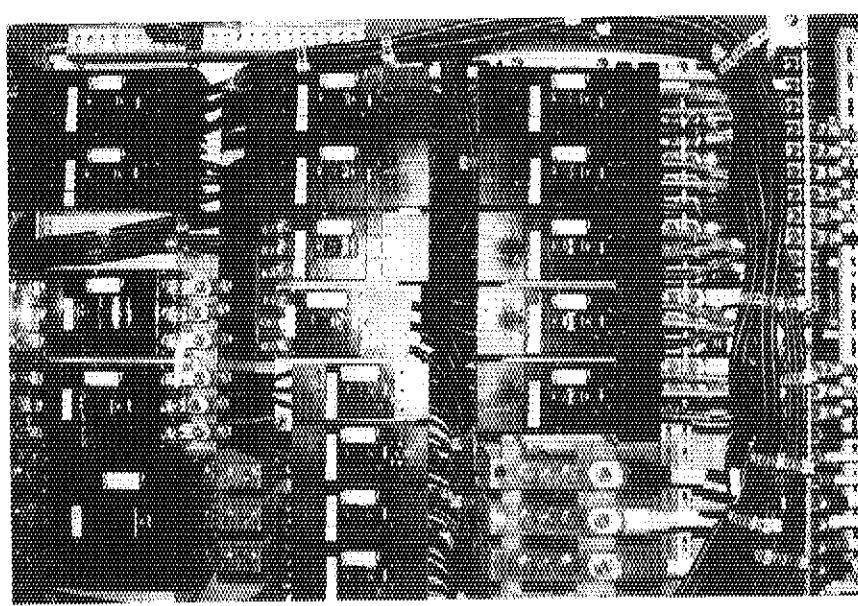


Photo. 1 サイクロトロン電源室分電盤内の415V
系受電系統。

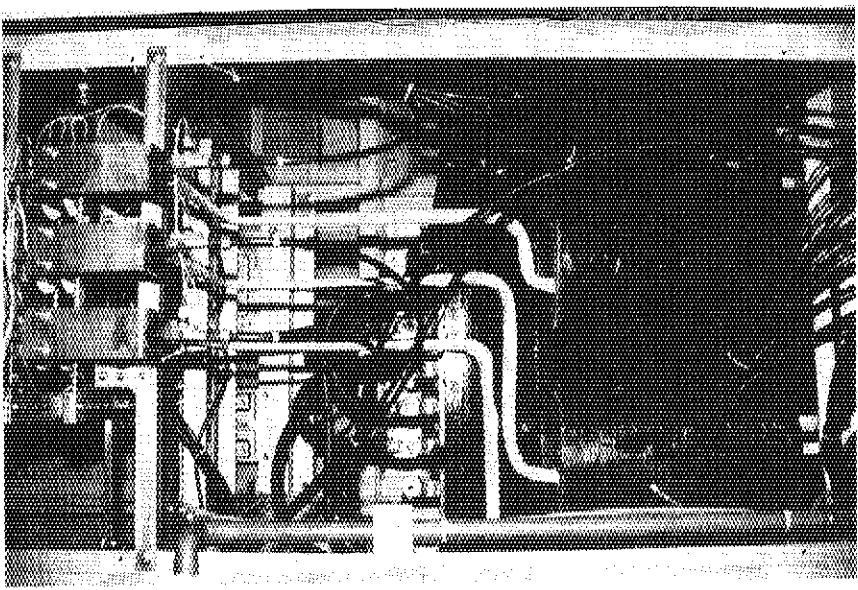


Photo. 2 CYC_POW_10(CMM用) 電源盤背面
内部の状態。下部に入力変圧器、上部に
整流器などが配置されている。

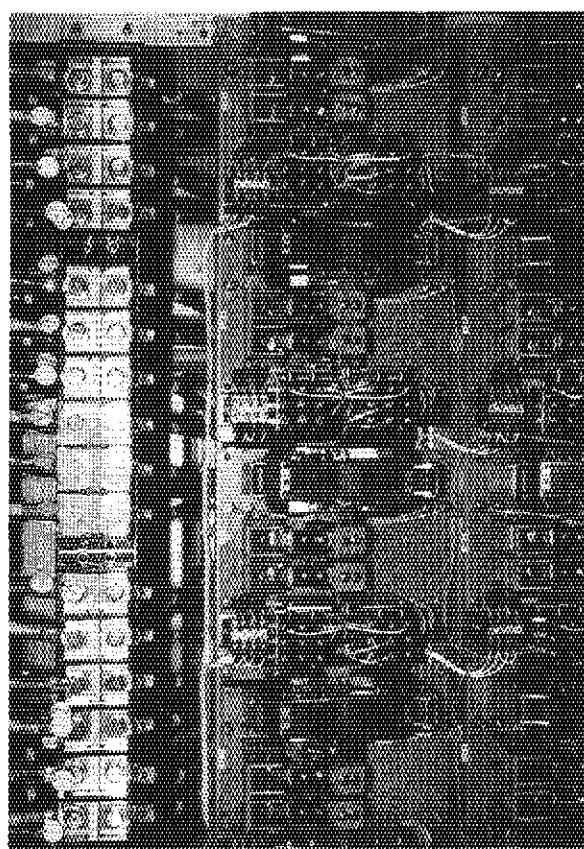


Photo. 4 負荷切替盤 BT_LS_10 背面内部の電磁
接觸器および入出力端子部分。

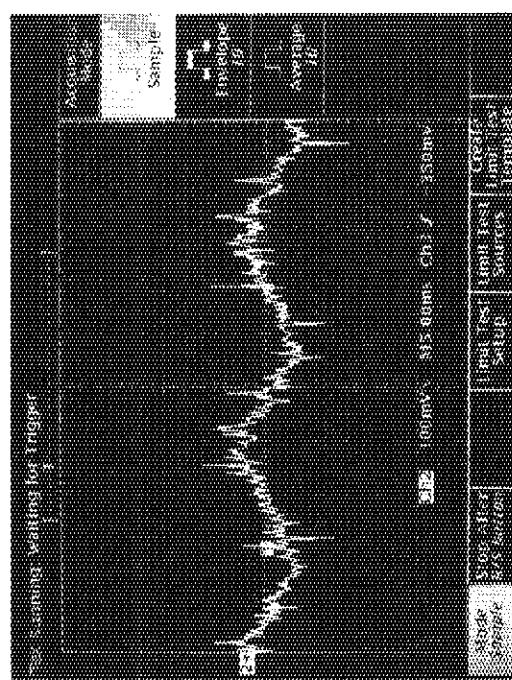


Photo. 3 CYC_POW_10 (CMM用) 電源での電
流リップル測定結果 (出力電流 : 900A
通電時)。

4. 管路内ケーブル集合部分の温度評価および測定結果

サイクロトロン装置の電源の大部分は、前述のようにサイクロトロン棟1階北東端のサイクロトロン電源室内に設置されている。したがってサイクロトロン本体室やイオン室内等に配置されている多数の各種電磁石など、比較的大きな負荷電流を必要とする機器まで電力ケーブルを用いて通電しなければならない。これらの電力ケーブルは、サイクロトロン装置全体でかなりの量になり、建屋構造での幾何学的な制約から遮蔽壁を貫通させることが必要条件となる。

そのため建屋建設段階でのコンクリート打設時に、あらかじめ遮蔽設計を行った鋼管製の屈曲スリーブを埋め込み、その中を通線することとした。埋め込み配管敷設の一例を、Photo. 5に示す。これらの屈曲スリーブには、150 A および 200 A の規格厚肉鋼管が用いられている。金属管路内敷設ケーブルの許容電流については、電気設備技術基準告示第29条(1972)によって定められている。この技術基準によれば、敷設電線数によって許容電流量が異なり、多数の電線を敷設するほど許容電流は低下する。一方、十分な放射線遮蔽能力を保証するためには、同一管路内に可能な限り多量の電線ケーブルを敷設することが要請される。これらの相反関係を考慮し、管路内の充填(布線)率は、30%が確保されるようにした。

また建築基準法での防火区画管理およびハロンガス消火における密閉性などの問題から、通線後イオン室側のスリーブ端は空隙シール材のネオシールにより密閉された。ケーブル通線状態についての具体例として、ケーブル中継室天井部分の実装状態を Photo. 6 に示す。

これらの状況から、スリーブ中の電力ケーブルについては、通電時に内部発熱に起因する温度上昇が問題となる可能性があるため、計算により温度上昇を評価とともにサイクロトロンを運転した場合の温度測定も実施して、それら相互の比較検討を行った。

4. 1 ケーブルの内部発熱に伴う温度上昇の評価

スリーブ中に敷設されている実際の低圧電力用ケーブルは、部分的にはスリーブ中で管壁に接触しているものと考えられるが、ここでの温度評価の場合には、接触熱抵抗の見積など熱的条件の設定が困難で複雑となること、温度評価は安全側の解析でよいことなどを考慮して、ケーブル集合体部分の温度は温度条件が最も厳しくなる場合を想定し、ケーブルは貫通スリーブ中心部分空間に浮上している計算モデルとした。

また施工されている貫通スリーブは、遮蔽壁中で屈曲され 3 m 以上の長さとなっている場合が多いので、熱評価では無限長の円筒体モデルとして置換できる。したがって熱評価では、円筒体モデルは単位長さ(1 m)当たりでの数値計算とした。

なお貫通スリーブ周囲のコンクリート壁の熱容量は、非常に大きいと考えられるので、この部分の温度上昇は定常状態を想定するのではなく、簡単な断熱系を仮定しそれの温度上昇率から求めた。

(1) ケーブル集合体部分の発熱量

サイクロトロン装置の個別機器をそれぞれ最大定格で運転した場合に、ケーブル敷設本数と負荷電流量から最も温度上昇が大きいと想定されるケーブル集合体は、Fig. 12 に示すようにケーブル中継室から本体ピット室に敷設されているスリーブ No. 3-4 に収納されている部分である。この全長約 3 m のスリーブ中に敷設されている電力ケーブルは、サイクロトロン本体系のマグネットイックチャンネルおよびトリムコイル用などである。

ケーブル集合体部分の単位長さ (1 m) 当たりの発熱量 Q_T (kcal/h) は、Table 5 に示した内容を基にして算出した。通電電流量については最大使用条件を想定して、 150 mm^2 の電力ケーブル (CMC および CCC 用のもの合計 16 本) については、最大定格電流を通電するものとし、それ以外の断面積 38 mm^2 および 5.5 mm^2 などのケーブル (サイクロトロン本体真空排気系および CMC 用チラーユニットなどで、それぞれ数本) については、通電電流はサイクロトロンの運転にほとんど依存しないため、実際に測定された電流値を使用した。

まずケーブル集合体部分の内部発熱量を算出するため、单一のケーブル導体における直流抵抗 R (Ω) を次式により算出した。

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot (1 + u) \cdot \left\{ 1 + \alpha (T - 20) \right\} \quad (2)$$

ρ は導体の体積抵抗率であるが、ここでは断面積 1 mm^2 で長さ 1 m 当たりの軟銅の抵抗値 $1/58$ (Ω) を使用した。 S は導体の断面積 (mm^2)、 L は導体の長さ (m)、 u は撚線の撚込率であり、素線数 60 本以下では 2 %、60 本以上では 3 % となっている。また α は軟銅の温度係数 $0.00393 (\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ 、 T は導体の温度 ($^\circ\text{C}$) である。

ケーブル全体の発熱量は、 $T = 30$ 、 $L = 1$ 、 $u = 0.03$ (150 mm^2 の場合) および $u = 0.02$ (38 mm^2 以下の場合) を用いて計算した。総発熱量 Q_T は Table 5 で示したように 117.9 W/m (101.4 kcal/h) となっているが、このうち導体断面積 150 mm^2 の電力ケーブルの寄与が 95.6 % とその大部分を占めている。

(2) 周囲コンクリート部分の温度

簡単な熱解析モデルとして Fig. 13 に示すような断熱系の円筒状コンクリート体を考え、この媒質内平均温度上昇率 T_R ($^\circ\text{C}/\text{h}$) を求める。平均温度上昇率を求めるこの項では、ケーブル全体を発熱体と考えることとし、ケーブル集合体の形や内部の温度分布は問題としない。

ここで周囲コンクリートの重量を m (kg)、比熱を c (kcal/kg \cdot $^\circ\text{C}$) とすれば、簡単に $T_R = Q_T / (m \cdot c)$ で求められる。コンクリートの密度を 2100 kg/m^3 とすると、 $m = 2.63 \times 10^4$ 、 $c = 0.21$ より $T_R = 1.84 \times 10^{-2}$ となる。したがってサイクロトロンの連続運転時間を 105 h (1 週間単位で月曜日朝～金曜日夕方まで) と考えると、この間での平均の温度上昇 (T_w) は 1.93°C となる。

これから円筒状コンクリート体の外側表面温度 T_1 は、施設建屋内における通常の空調状態で最も高くなると考えられる室温 T_0 を 30°C に設定して、 $T_1 = T_0 + T_w = 32^\circ\text{C}$ とする。またコンクリート円筒体中の温度勾配は、定常状態

に近い長時間の現象に対しては対数的な分布を示すので、内側の表面温度 T_2 は平均温度との関係から、次式で求められる。

$$\frac{\ln T_1 + \ln T_2}{2} = \ln (T_1 + 1.93) \quad (3)$$

これから、内側表面温度 T_2 は 36.0°C となる。なおスリーブとして埋め込まれている 200A 鋼管層（外径 216.3 mm 、厚さ 8.2 mm ）部分で生ずる温度差は、鉄の熱伝導率を $39\text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ とすると、約 0.034°C と極小値なため無視した。

(3) ケーブル集合体外側温度

ケーブル外側表面からスリーブ内側表面への熱伝達は、密閉流体層内（水平同心円筒間）の自然対流熱伝達¹⁴⁾および輻射熱伝達とする。なお密閉流体層内の取扱いとしたのは、前述のように実際のスリーブ部分端末でのケーブル処理が、スリーブ片側で密閉される施工方法となっているためである。

ケーブル集合体部分は、温度上昇が最も厳しくなると考えられる配置として、Fig. 14 に示すようにケーブル 24 本が互いにぴったりと接している最密状態とした。このモデルは、中心部 3 層分のケーブル 16 本が導体断面積 150 mm^2 の電力ケーブルとし、上下それぞれ 1 層分の合計 8 本のケーブルが、断面積 38 mm^2 および 5.5 mm^2 などのケーブルを、断面積の等価換算で 150 mm^2 のケーブルに置換したものである。このモデルを用いて、輻射熱伝達を支配する実効的な外側表面積 $A_H (\text{m}^2)$ および対流熱伝達に寄与する等価断面積の円の直径 $d_1 (\text{m})$ を求めた。

このうちケーブル集合体の等価断面積は、図中の円で示された範囲とほぼ同等であり、 $d_1 = 0.125$ と換算される。また実効的な外側表面積は、同様に電力ケーブル 1 本当たりの表面積を $A (\text{m}^2)$ とすると、それらの幾何学的関係から $A_H = (8 \times 1/2 + 6 \times 2/3) \cdot A = 8 \cdot A$ となるので、 $A = \pi \times 2.4 \times 10^{-2} = 0.0754$ から $A_H = 0.603$ となる。ちなみにこの表面積 0.603 m^2 について、逆に表面積が等しい円に換算するとその直径は 0.192 m となるので、ケーブル集合体の等価断面積の直径 0.125 m に比べて 54% も大きくなっている。対流損失に比べて実効的な輻射損失の増加が見込まれる。

まず単位長さ当たりの自然対流熱伝達量 $q_c (\text{kcal/m}\cdot\text{h})$ は、次式で算出される。

$$q_c = \frac{\lambda \cdot 2\pi \cdot \Delta T}{\ln (d_2/d_1)} \quad (4)$$

ここで λ は流体層のみかけの熱伝導率 ($\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$)、 ΔT は内外円筒面間の温度差 ($^{\circ}\text{C}$)、 d_2 は円筒外側（スリーブ側内壁）の直径 (m) である。このうち λ は $\lambda = \lambda \cdot N_u$ で表され（ λ は流体層における平均温度での熱伝導率）、さらにヌセルト数 N_u はレイレイ数 R_s と、 $N_u = 0.11 \cdot R_s^{0.2}$ ($3.8 < 10g_{10}R_s < 6$) の関係がある。そしてレイレイ数 R_s は、次式で求められる。

$$R_a = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{(a \cdot \nu)} \quad (5)$$

ここで g は重力加速度 9.81 m/s^2 、 β は流体の体膨張係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 D は流体層の厚さ (m)、 a は流体の温度伝導率 (m^2/s)、 ν は流体の動粘性係数 (m^2/s) である。

一方単位長さ当たりの輻射熱伝達量 q_R (kcal/m \cdot h) は、 σ をステファン・ボルツマンの定数 ($4.88 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$)、 総括吸収率を ϕ 、 スリーブ内側表面積を A_c (m^2)、 ケーブル外側表面温度を T_s ($^{\circ}\text{C}$) とすると

$$q_R = \sigma \cdot \phi \cdot A_c \cdot \left\{ \left(\frac{273+T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+T_2}{100} \right)^4 \right\} \quad (6)$$

となる。また ϕ は、次式で求められる。

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\varepsilon_H} + \frac{A_H}{A_c} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) \quad (7)$$

A_H および A_c は、それぞれケーブル集合体外（高温）側およびスリーブ内壁（低温）側の表面積 (m^2)、また ε_H および ε_C も同様にそれぞれの部分の輻射率である。

これらの関係から、 $Q_T = q_c + q_R$ となる熱バランス条件が成立する温度 $T_s = \Delta T + T_2$ を、試算法により求める。

$T_s = 72^{\circ}\text{C}$ ($T_2 = 36^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T = 36^{\circ}\text{C}$ 、 平均温度 54°C) とすると、対流熱伝達分については $\beta = 1 / (273 + T_2 + \Delta T / 2) = 1 / 327$ 、 $a = 0.0968 / 3600$ 、 $\nu = 0.190 \times 10^{-4}$ 、 $\lambda = 0.0243$ 、 $R_s = 1.12 \times 10^5$ 、 $N_u = 3.20$ 、 $\lambda_r = 7.78 \times 10^{-2}$ 、 $D = (d_2 - d_1) / 2 = 0.0375$ 、 $d_2 = 0.20$ 、 $d_1 = 0.125$ であるので、 $q_c = 37.4$ と求まる。

また輻射熱伝達量 q_R については、 $\sigma = 4.88$ 、 $A_H = 0.603$ 、 $A_c = 0.628$ 、 $\varepsilon_H = \varepsilon_C = 0.6$ とすると $\phi = 0.43$ となるので、 $q_R = 63.9$ となる。これらの試算結果から、発熱量 ($Q_T = 101.4$) と熱損失 ($q_c + q_R = 101.3$) の熱収支はほぼバランスしており、ケーブル集合体の外側表面温度 T_s は 72°C と見積もられる。

(4) ケーブル単体および集合部分中心の温度

電力ケーブル 1 本当たりの絶縁体内側表面と外側表面間の温度差 ΔT_c は、次式で求まる。

$$\Delta T_c = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_c \cdot H} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (8)$$

ここで r_1 および r_2 は、それぞれ電力ケーブル単体における絶縁体部分内側および外側の半径 (m)、 λ_c はケーブル絶縁体の熱伝導率 ($\text{kcal/m \cdot h \cdot }^{\circ}\text{C}$)、 H は円筒体 (ここではケーブル) の長さ (m)、 Q_c はケーブル 1 本当たりの発熱量 (kcal/h) である。実際に使用している PHCT ケーブルの断面図は、Fig. 14 に示されているように、 $r_1 = 1.6.1 \text{ mm}$ 、 $r_2 = 2$

4. 0 mm であり、また $\lambda_c = 0.26$ 、 $H = 1$ 、 $Q_c = 6.94 \times 0.86 = 5.97$ (単純平均通電電流 237 A の場合) であることから、ケーブル 1 本当たりの温度上昇 ΔT_c は 1.46 °C となる。

さらに前述のケーブル敷設モデルでの各ケーブル毎の温度分布については、解析的に正確に求めるのは難しいので、ここでは簡便な推定を行った。ケーブル集合体モデルでは、断面積 150 mm² 以外のケーブル 8 本分は、ケーブル集合体の外側に敷設されているものと仮定しており、また実際の発熱量も非常に小さいので、それらのケーブル内部の温度勾配は無視できるものと考えられる。これらの条件を考慮し、ケーブル集合体中心部分の温度 T_4 (前述の Fig. 14 の中央斜線部分で、この領域は等温状態とする) は、ケーブル表面温度 T_3 からケーブル絶縁体 3 層分だけ高くなる ($T_4 = T_3 + 3 \cdot \Delta T_c$) と仮定した。この仮定から $T_4 = 73 + 4.4 = 77.4$ °C となり、ケーブル集合体中心部分の最高温度は、最も温度条件が厳しくなるケーブル配置および通電電流条件で、80 °C 程度にまで達するものと推定される。

この温度は、PHCT ケーブルの絶縁体最高許容温度 80 °C とほぼ同程度であり、ほとんど余裕のない数値となっている。しかしながら実際にスリーブ中に敷設されているケーブルは、その一部分がスリーブ内壁に接触しており、またケーブル相互間にはかなりの空隙が存在するものと予測される。このためケーブル部分で発生したジュール熱は、かなりの部分が伝導損失によりコンクリート壁側に散逸するほか、空隙の存在による実効的な表面積の増大により輻射損失と対流損失の両者も増加するものと想定され、ここで熱解析評価モデルとは多少異なっていると考えられる。

それゆえ実際に測定されるケーブル部分の温度は、計算で評価されたものより若干低い値になるものと推定される。

4. 2 温度測定結果

ケーブル集合体部分の温度測定は、前述の温度評価を行ったスリーブ No. 3-4 について実施したが、参考のために近傍の CMM および CGL 用等のケーブルが通線されているスリーブ No. 3-2 の中央部分のみについても実施した (Fig. 12 参照)。温度測定には、シース型の C-C 熱電対を使用した。C-C 熱電対は、ケーブル集合体断面方向の特定位置に固定するのが技術的に困難なことから、スリーブを貫通する電力ケーブル等を全て収納した後、通電しない別の細いケーブルに固縛してスリーブ中に引き込んだ。そのためスリーブ内部断面方向での正確な熱電対位置は不明であるが、施工状況から判断してケーブル集合体外側に配置されている可能性が高い。なおスリーブ深さ方向位置は、スリーブ No. 3-4 の全長約 3 m の端部から 0.5、1.0 および中央の 1.5 m とした。なおケーブル中継室側のスリーブ開口部付近および室温も測定した。

温度測定の数値は、ディジタル多点記録計 (Advantest : TR2724 型) を用いて、30 min 程度の間隔で印字・記録した。ケーブル集合体部分における通電開始からの温度上昇の測定例を、Fig. 15 に示す。この測定例では、温度は 5 h 程度で平衡に達しているが、サイクロトロンの調整状態によっては、この程度の時間で必ずしも平衡温度が得られるとは限らない。これらの温度上昇の測定結果を、加速イオン種およびケーブル発熱量などとともに Table 6 に

示す。表中に示した各部の温度は、いずれも通電開始後 6 ~ 10 h 程度で、ほぼ平衡状態に達している時の数値を示した。加速されたイオン種とエネルギーは、 ${}^4\text{He}^{2+}$ の 20 MeV、50 MeV および 100 MeV、 H^+ の 10 MeV、 ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$ の 175 MeV および ${}^{40}\text{Ar}^{13+}$ の 460 MeV などであり、これらの運転条件で得られた温度上昇は、No. 1 & 2 で 2 ~ 21 °C、No. 3 & 4 で 1 ~ 14 °C および No. 5 & 6 で 2 ~ 15 °C、No. 7 & 8 で 1 ~ 5 °C 程度であった。

一般的に AVF サイクロトロンの運転における等時性磁場の形成では、CCC6、CCC7 および CCC(C (No. 12) のトリムコイルがいずれも最大電流値付近にあるような磁場配位とはならないので、このスリーブ中のケーブル全体の通電電流量は、CMC の電流 400 ~ 1200 A に強く依存することになる。ケーブル集合体の単位長さ当たりの発熱量は約 20 ~ 80 W/m となつたが、このうち CMC の占める割合は、約 55 ~ 90 % となっている。

さらにケーブル発熱量と温度上昇との関係を Fig. 16 に示す。温度上昇は、ケーブル発熱量に対していずれも緩やかに 2 次曲線的な増加傾向を示しているが、それぞれのデータにはかなりのバラツキが見られる。これは前述のように、1) 温度上昇の数値が必ずしも平衡状態に到達している状態でのものではなく、しかも最大値とはなっていない可能性があること、2) スリーブ中の熱電対とケーブル集合体との相対的な位置関係が正確に分からぬいため、実際に集合体のどの断面部分を測定しているのか不明であること、などが主要な因子と考えられる。

なお参考のため、ケーブル集合体部分での最大想定発熱量 Q_T における温度上昇を、簡単に推定してみる。Fig. 16 中で最も温度上昇が大きな測定位置 No. 5 & 6 の曲線について、温度上昇 (ΔT_M) と発熱量 (Q_M : W/m) との関係を最小 2 乗法により 2 次式 ($\Delta T_M = 1.75 \times 10^{-3} \cdot Q_M^2 + 7.80 \times 10^{-2} \cdot Q_M + 0.327$) として求めた。この式に $Q_T = Q_M = 118$ を代入すると、 ΔT_M は 33.9 °C と求まる。この温度上昇の値約 34 °C は、熱解析の計算で評価した数値の 36 °C とほとんど同等であり、したがって前述の解析結果は温度上昇の状態をほぼ忠実に反映しているものと考えられる。

Table 5 スリーブ中のケーブル集合体発熱量の評価

導体断面積 m m ²	導体抵抗値 Ω / m	電流 A	ケーブル本数 本	発熱量 W / m
1 5 0	1. 2 3 × 1 0 ⁻⁴	2 6 0	1 0	8 3. 2
1 5 0	1. 2 3 × 1 0 ⁻⁴	2 0 0	6	2 9. 5
3 8	4. 8 1 × 1 0 ⁻⁴	5 2	3	3. 9
5. 5	3. 3 2 × 1 0 ⁻³	1 0	3	0. 9
3. 5	5. 2 2 × 1 0 ⁻³	4	1 5	0. 4
合 計			3 7	1 1 7. 9

註) 主要な負荷電流の数値については、マグネティックチャンネル、トリムコイル(CCC6、CCC7およびCCCC)が、それらの最大定格電流値、サイクロトロン本体真空排気系およびマグネティックチャンネル用チラーユニットなどは、それらの実績電流値をそれぞれ使用した。

なお発熱量 1 1 7. 9 (W / m) は、1 W = 0. 8 5 9 8 k c a l / h であるので、1 0 1. 4 (k c a l / m · h) に換算される。

Table 6 スリーブ中のケーブル集合体部分温度上昇測定結果

測定日	加速イオン種	温度測定位置		No.1 & 2	No.3 & 4	No.5 & 6	No.7 & 8	室温	マグネティック チャンネル	ケーブル集合体 発熱量 W/m
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		
1991/03/13	He(2+),50MeV	6.2	3.1	3.9	0.8	27.1	842.9	46.1		
1991/03/15	He(2+),50MeV	5.1	1.6	3.5	1.8	27.1	843.0	43.4		
1991/04/09	He(2+),50MeV	6.9	3.5	4.0	0.5	28.4	884.5	51.6		
1991/04/10	He(2+),50MeV	9.6	5.2	6.3	1.6	28.6	868.7	52.0		
1991/04/11	He(2+),50MeV	11.0	6.5	7.3	1.9	28.6	864.9	53.3		
1991/04/22	He(2+),20MeV	5.4	3.8	3.7	0.6	27.6	595.5	23.2		
1991/04/30	He(2+),100MeV	16.1	9.1	10.5	4.6	28.0	1203.5	76.6		
1991/05/28	H(+),10MeV	2.5	1.4	1.6	0.6	27.1	430.1	14.8		
1992/06/08	Ar(13+),460MeV	14.7	8.0	9.4	4.8	30.9	1224.1	80.1		
1992/11/24	Ar(8+),175MeV	12.7	7.1	8.4	4.2	28.5	1069.8	62.9		
1992/11/24	H(+),70MeV	20.7	13.5	15.4	5.1	29.6	1092.4	68.4		
1993/02/26	Ne(6+),120MeV	6.3	3.4	3.9	1.4	26.8	870.8	47.2		
1993/03/04	Ar(13+),460MeV	15.5	9.1	11.0	7.6	27.7	1163.7	73.1		

温度測定位置のNo. 1 & 2、No. 3 & 4等は、Fig. 1 2 中の熱電対設置場所を示す。

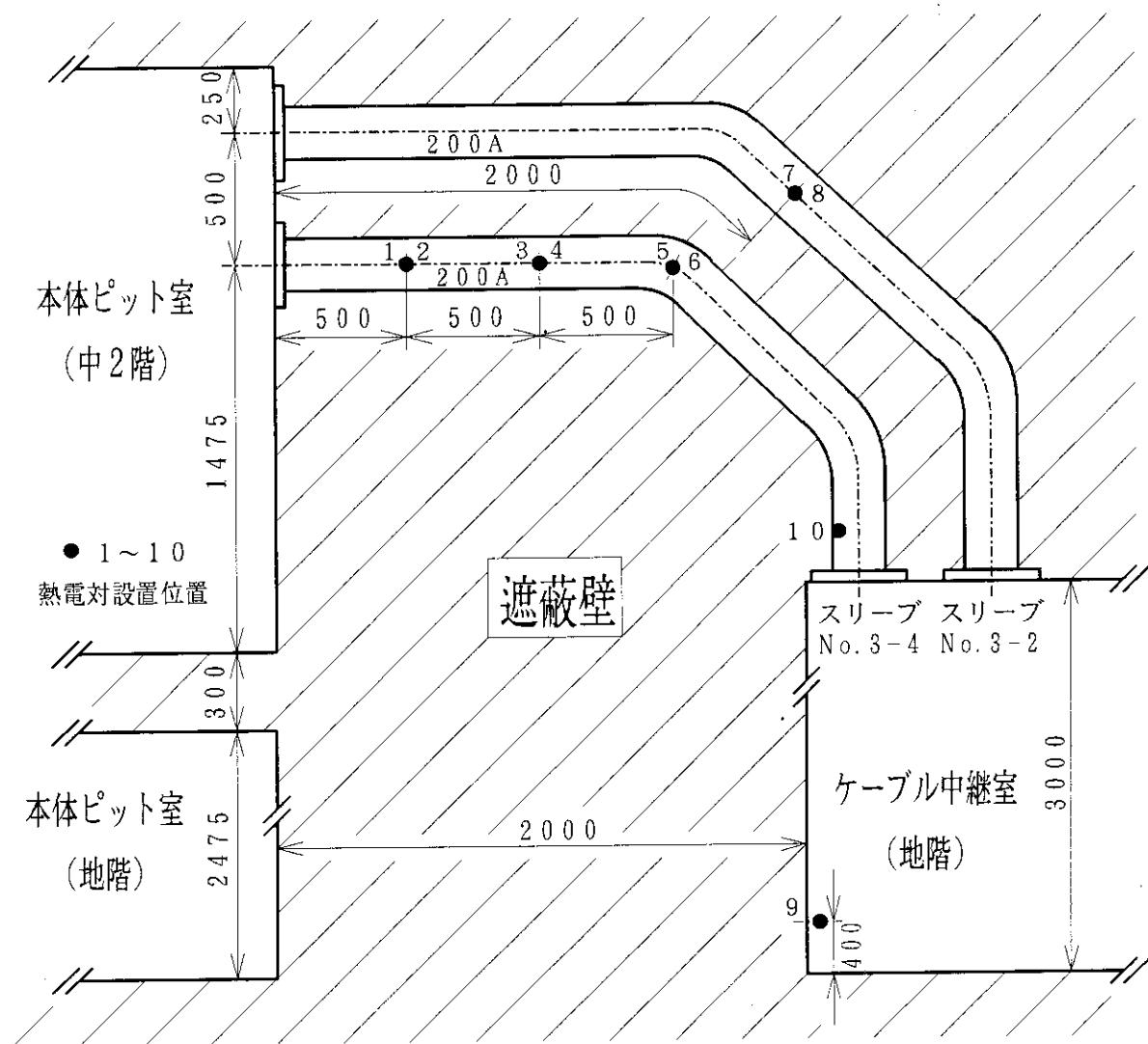


Fig. 12 屈曲スリーブ配置および温度測定用 C - C 热電対設置位置概略図

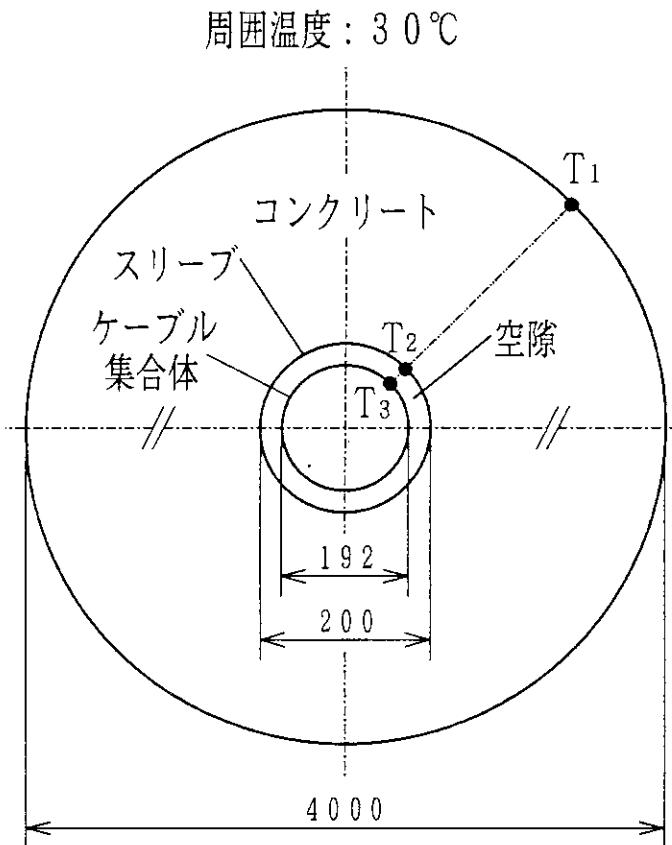


Fig. 13 ケーブル集合体外側温度評価モデル概略図

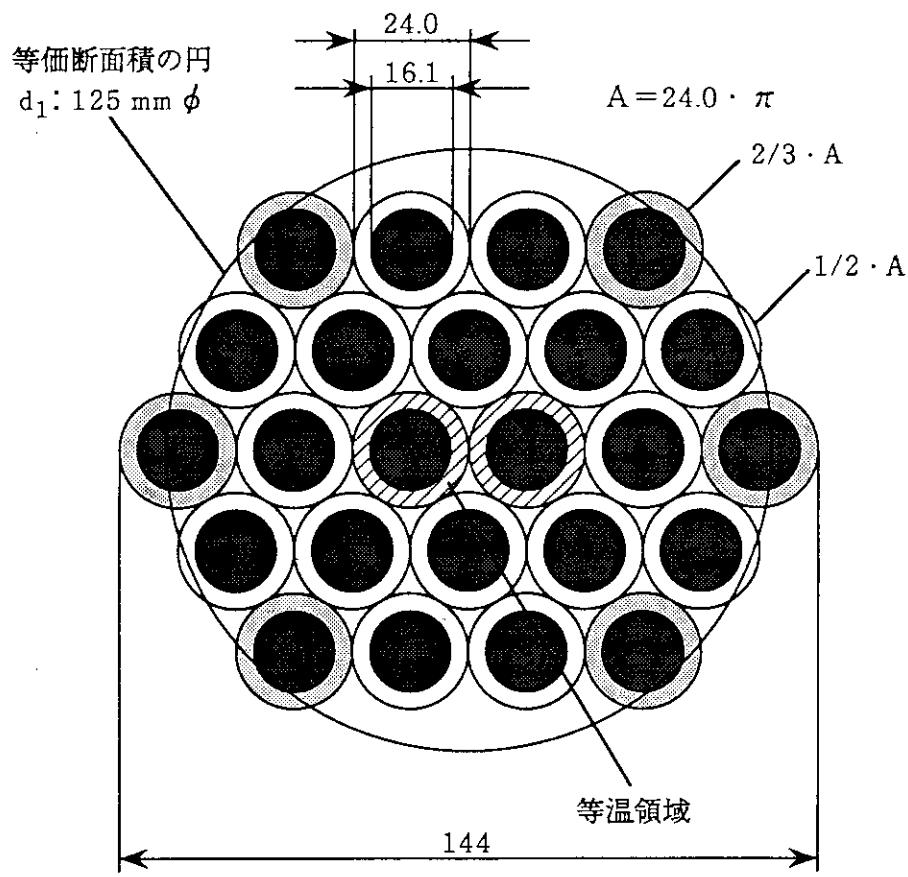


Fig. 14 ケーブル集合体の熱解析モデル

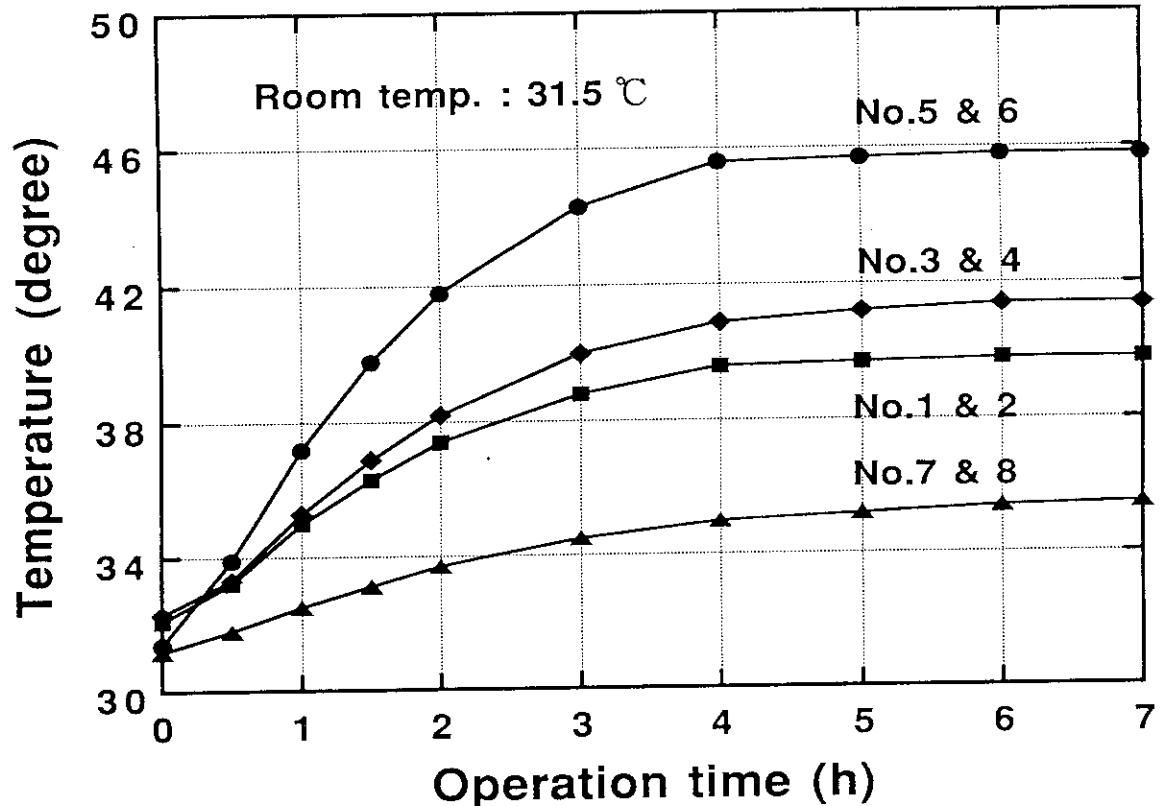


Fig. 15 $^{40}\text{Ar}^{13+}$, 460MeV の運転におけるケーブル集合体部分の温度上昇測定結果。図中の No. 1 & 2 あるいは No. 3 & 4 等は、Fig.12 中での熱電対の設置位置を示す。

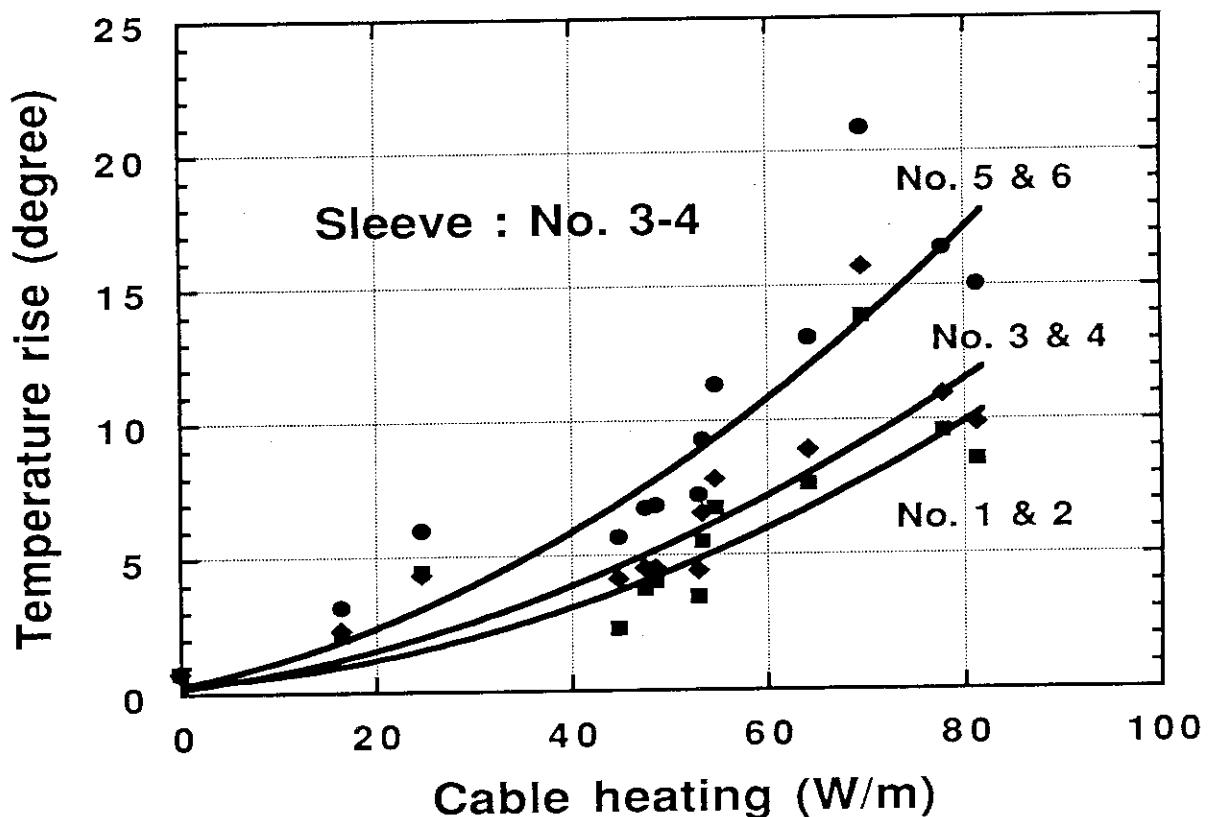


Fig. 16 ケーブル発熱量と温度上昇との関係。(No.1 & 2, No.3 & 4 等は、Fig.12 中での熱電対設置位置を示す。)

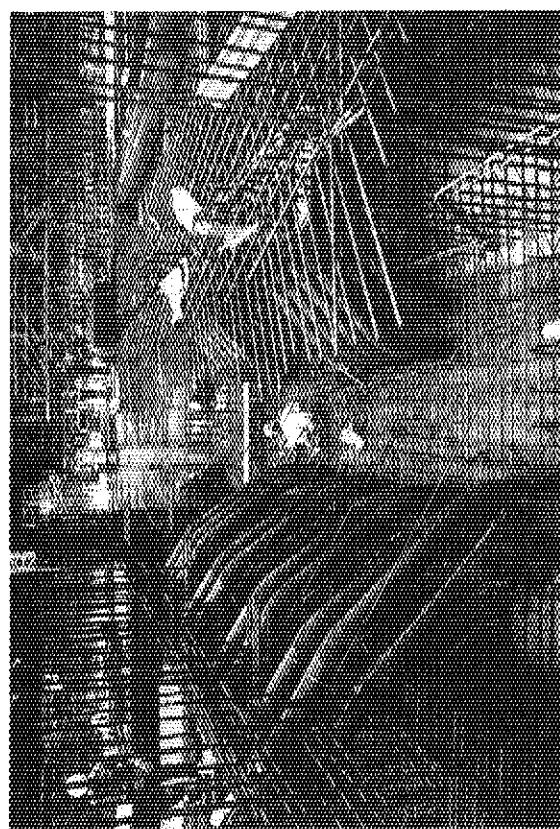


Photo. 5 遮蔽壁貫通スリーブ施工状態の一例。ケーブル中継室上部の屈曲スリーブ群：左側がサイクロotron本体ピット室(中2階)，右側がサイクロotron電源室との遮蔽壁間に埋め込まれた。



Photo. 6 遮蔽壁貫通スリーブ端末部分のケーブル通線状態の一例(ケーブル中継室の天井部分)。

5. あとがき

原研 A V F サイクロトロン装置は、初期の調整運転段階から研究利用のための 24 h 連続運転の現在まで、約 2 年間にわたり全体として順調に稼働している。従来設備の 6. 6 kV 高圧受電系統では、特に夏期において落雷に起因する送電側での停電が発生し、常時通電を基本とする機器・装置等の動作に対し支障を来たしていた。しかしながらイオン照射研究施設の建設とともに、6 6 kV の特別高圧受電設備への更新が行われた結果、これまでの 3 年間では前述のような外的要因による停電は全く発生していない。比較的大きな規模の真空排気系を持つサイクロトロン装置では、特に停電による装置への影響は大きく、装置の効率的な運用あるいは安全確保などの観点から、大幅な改善が計られた。

またサイクロトロン装置側の電源系についても、これまで大きな事故・故障等はなく極めて良好な状態で稼働している。発生した小故障の代表的なものでは、1) C C C C B (トリムコイルの No. 11) 用電源の極性切り換え器部分が接触不良のため発熱し、極性切り換え器およびその周囲の制御用フラットケーブル等の一部が焼損した、2) 数台の電源において、パワー T r 2 S D 873 の保護用ヒューズが切れた (ただしパワー T r は、いずれも健全であった)、3) 温度調整用基板内の低圧直流電源回路電解コンデンサーの不良 (調査の結果、製造ロットの不良であることが判明) により、その部分の保護用ヒューズが溶断した、4) ビームコース切り替え時に、負荷切替盤の動作が数回不調となつた (主として、I L 関係の制御系通信エラーが原因) などが挙げられる。

また 1992 年 8 月および 1993 年 8 月のサイクロトロン装置の定期点検時には、電源関係についても総合的な定期点検を行った。電源側では、電源盤部分の点検・清掃、電源出力電流および出力電圧、安定度および電流リップルの測定などを実施した。一方負荷側では、電磁石のコイル接続端子部分の締め付け状態の確認、コイル電圧測定およびメガーによる絶縁試験などを行った。

これらの結果、電源盤部分での交流入力電源の表示灯切れなどの簡単な不具合はあったが、特に性能面で問題となるような異常は発見されなかった。測定された数値については、約 3 年前に設置された時点でのデータと有意差はなく、電源の仕様性能は良好な状態で維持されていることが確かめられた。

謝辞

本報告書を作成するにあたって、色々と指導していただいたイオン加速器管理課、貴家恒男課長に深く感謝いたします。

またイオン照射研究施設への受電設備について、種々のコメントさらには系統図などを作成するための資料を提供していただいた、管理部工務課、福田清総括主査に心から謝意を表します。

5. あとがき

原研 A V F サイクロトロン装置は、初期の調整運転段階から研究利用のための 24 h 連続運転の現在まで、約 2 年間にわたり全体として順調に稼働している。従来設備の 6. 6 kV 高圧受電系統では、特に夏期において落雷に起因する送電側での停電が発生し、常時通電を基本とする機器・装置等の動作に対して支障を来たしていた。しかしながらイオン照射研究施設の建設とともに、66 kV の特別高圧受電設備への更新が行われた結果、これまでの 3 年間では前述のような外的要因による停電は全く発生していない。比較的大きな規模の真空排気系を持つサイクロトロン装置では、特に停電による装置への影響は大きく、装置の効率的な運用あるいは安全確保などの観点から、大幅な改善が計られた。

またサイクロトロン装置側の電源系についても、これまで大きな事故・故障等はなく極めて良好な状態で稼働している。発生した小故障の代表的なものでは、1) C C C B (トリムコイルの No. 11) 用電源の極性切り換え器部分が接触不良のため発熱し、極性切り換え器およびその周囲の制御用フラットケーブル等の一部が焼損した、2) 数台の電源において、パワー Tr 2 S D 873 の保護用ヒューズが切れた（ただしパワー Tr は、いずれも健全であった）、3) 温度調整用基板内の低圧直流電源回路電解コンデンサーの不良（調査の結果、製造ロットの不良であることが判明）により、その部分の保護用ヒューズが溶断した、4) ビームコース切り替え時に、負荷切替盤の動作が数回不調となつた（主として、I L 関係の制御系通信エラーが原因）などが挙げられる。

また 1992 年 8 月および 1993 年 8 月のサイクロトロン装置の定期点検時には、電源関係についても総合的な定期点検を行った。電源側では、電源盤部分の点検・清掃、電源出力電流および出力電圧、安定度および電流リップルの測定などを実施した。一方負荷側では、電磁石のコイル接続端子部分の締め付け状態の確認、コイル電圧測定およびメガーによる絶縁試験などを行った。

これらの結果、電源盤部分での交流入力電源の表示灯切れなどの簡単な不具合はあったが、特に性能面で問題となるような異常は発見されなかった。測定された数値については、約 3 年前に設置された時点でのデータと有意差はなく、電源の仕様性能は良好な状態で維持されていることが確かめられた。

謝 辞

本報告書を作成するにあたって、色々と指導していただいたイオン加速器管理課、貴家恒男課長に深く感謝いたします。

またイオン照射研究施設への受電設備について、種々のコメントさらには系統図などを作成するための資料を提供していただいた、管理部工務課、福田清総括主査に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 萩原 幸 : Isotope News, 396, p10 (1987)
- 2) 武久 正昭 : 放射線化学, 45, p33 (1988)
- 3) 萩原 幸, 田中 隆一 : 日本原子力学会誌 Vol. 31, No. 9, p983 (1989)
- 4) 田中 隆一 : 日本原子力学会誌 Vol. 33, No. 11, p1016 (1991)
- 5) 佐藤 章一、石垣 功 他 : 原子力工業 Vol. 40, No. 2, p6 (1994)
- 6) 秋山 信義 : Private communication
- 7) 藤岡 学 : Private communication
- 8) I E E E s t d. 3 8 3 「垂直トレイ燃焼試験」
- 9) 福田 清 : Private communication
- 10) 萩原 幸, 森田 洋右 他 : 古河電工時報 第75号, p171 (1985)
- 11) 古河電工 : カタログ「古河超耐放射線性難燃ケーブル」(1987)
- 12) 霜田 光一, 桜井 捷海 : 「エレクトロニクスの基礎(新版)」, 袞華房 (1984)
- 13) 島田 公明 : 「アナログ回路応用マニュアル」, 日本放送出版協会 (1986)
- 14) 日本機械学会 : 「伝熱工学資料(改訂第3版)」(1975)
- 15) Arakawa, K., Nakamura, Y., et al.: Proc. 4th Japan-China Joint Symp. on Accel. for Nucl. Sci. and their Applic., Beijing, China, p173 (1990)
- 16) Arakawa, K., Nakamura, Y., et al.: Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p34 (1991)
- 17) Arakawa, K., Nakamura, Y., et al.: Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p119 (1992)
- 18) Kamiya, T., Yokota, W., et al.: Proc. 6th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Tokyo, Japan, p281 (1987)
- 19) Fukuda, M., Arakawa, K., et al.: Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p138 (1991)
- 20) Kumata, Y., Fukumoto, Y., et al.: Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p526 (1992)
- 21) Okumura, S., Agematsu, T., et al.: Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p356 (1991)
- 22) Okumura, S., Agematsu, T., et al.: Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p648 (1992)
- 23) Nakamura, Y., Arakawa, K., et al.: Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p194 (1991)
- 24) Yokota, W., Ishibori, I., et al.: Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p70 (1991)
- 25) Dupont, C., Yongen, Y., et al.: Proc. Int. Conf. Ion Sources, 265 (1989)
- 26) Yokota, W., Nara, T., et al.: Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p336 (1992)
- 27) 上松 敬 奥村 進 他 : 第35回放射線化学討論会予稿集 p73 (1992)
- 28) Yokota, W., Fukuda, M., et al.: Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p581 (1992)

付録 T I A R A 施設およびサイクロトロン装置の概要

(1) T I A R A 施設

T I A R A 施設全体の 1 階および地階平面図は、本文中の 1 項でそれぞれ Fig. 1 A および Fig. 1 B としてすでに掲げた。T I A R A 施設 (Photo. A 1 参照) は、サイクロトロン棟、複合ビーム棟およびイオン照射研究棟から構成され、それぞれ各棟は廊下等により機能的に連結されている。

このうちイオンビーム研究棟は、延べ面積 4700 m²、地下 1 階地上 2 階建の鉄筋コンクリート構造で、主として施設の運転管理に必要な室、外部利用者のための共同利用室、ホットの実験を行う室および電気・機械室等から構成されている。

複合ビーム棟は、延べ面積 4400 m²、地下 1 階地上 2 階建の構造であり、地階に 2 つのターゲット室や加速器設備関連の室など、1 階にはタンデム加速器等 3 台の加速器を収納する本体室、3 つのターゲット室および制御室など、2 階には計測・測定室や準備室などがそれぞれ配置されている。

サイクロトロン棟は、延べ面積 8100 m²、地下 1 階地上 3 階建の鉄筋コンクリート構造となっている。地階部分に 3 つのイオン室とサイクロトロン装置関連の室のほか、実験者のための軽・重イオン準備室や排水処理関連の室など、1 階には、サイクロトロン本体室のほか 5 つのイオン室、ISOL (Isotope Separator On Line) 関係の室など、2 階（棟北側隅の一部分）にはホット廃ガス処理室が、それぞれ設置されている。

これら T I A R A 施設の大部分は、第 1 種管理区域（空気または物の表面が放射性同位元素で汚染される可能性のある区域）と第 2 種管理区域（外部放射線のみが対象となり、1 週間につき線量当量が 300 μSv を超えるか、あるいは超えるおそれのある区域）に分割されて、放射線安全管理が実施されている。

なお T I A R A 施設の建設は、第 1 期および第 2 期工事に分割して実施された。このうち第 1 期工事分として、サイクロトロン棟とイオン照射研究棟全体および複合ビーム棟の一部（タンデム本体室および第 1 ターゲット室部分）が先行して建設された。第 1 期分施設の建設は、1988 年 7 月に着工され、約 1 年 5 ヶ月後の 1990 年 12 月には竣工した。第 2 期工事分は、前掲 Fig. 1 A および Fig. 1 B 中で示したように複合ビーム棟の大部分の範囲であり、1991 年の 11 月に着工され、1993 年の 7 月には竣工した。

(2) サイクロトロン装置

サイクロトロン装置の全体構成を表す模式的な図を Fig. A 1 に示す。サイクロトロン装置¹⁵⁻¹⁷⁾の空間的な構成は、イオン源系、イオン入射系¹⁸⁾、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系の 4 つの部分に大別されるが、機能的な観点からは電磁石系、RF 系^{19), 20)}、ビーム診断系、計算機制御系^{21), 22)}、電源系、真空排気系²³⁾および冷却系などにも分類できる。

軽イオン用のマルチカスプイオン源²⁴⁾、あるいは重イオン用の ECR (Electron Cyclotron Resonance) 型イオン源 (OCTOPUS)²⁴⁻²⁶⁾のいずれかで生成されたイオンビームは、イオン入射系を水平に輸送され、AVF サイク

ロトロン真下の中心位置で、上方に90度偏向されて垂直入射される。イオンビームはインフレクターにより水平面内の軌道に移され、ディーに発生しているR F電場と上下磁極間の磁場により螺旋状に加速された後、静電デフレクターやマグネティックチャンネルなどによりさらに軌道が外側に曲げられ、加速箱から引き出される。

サイクロトロンから引き出されたイオンビームは、ビーム輸送系に配置されている4極電磁石、ステアリング電磁石および偏向電磁石、さらには各種のビーム診断機器などを用いて、選択されているいずれかのビームポートまで輸送され、実験に利用される。

これらのサイクロトロン装置の主要な諸元および性能一覧表をTable A 1に示す。サイクロトロン本体(Photo. A 2 参照)は、住友重機械工業(住重)製のAVF(Azimuthally Varying Field)型であり、2ディーの4セクターで、引き出し半径92.3 cm(設計値)である。R F周波数は10.6~22.0 MHz可変であり、同軸型共振器の採用によりディー電圧は最大60 kVまで発生できる。加速ハーモニック数は、1、2および3が可能であり、加速可能粒子はM(質量)/Z(荷電数)の比が6.5以下となっている。

ビーム輸送系のビームライン(総延長で197 m)は、水平の主ビームコース8本のほか、副ビームコース5本(このうち4本は垂直ビームコース)が設置されており、これらのビームコースに配置されている実験利用ポートは、合計16ヶ所となっている。

サイクロトロン装置におけるイオンビームの特徴的な利用については、前述のように大面積均一照射および単一パルスビームの発生等が可能な設計となっている。このうち大面積均一照射については、ビーム輸送系のビームライン3ヶ所(L X、L DおよびH Yコース)にビームスキャナー²⁷⁾が設置されており、最大 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の試料範囲をフルーエンス±10%程度の均一度で照射可能にしている。またイオンビームの単一パルス化²⁸⁾は、イオン入射系に設置されているパルス(P)型チョッパーと、ビーム輸送系に設置されている正弦波(S)型チョッパーの組み合わせにより、パルス間隔 $1 \mu\text{s} \sim 1 \text{ ms}$ の範囲で実現されている。

(3) サイクロトロン装置の製作・据え付け・調整等の経緯

サイクロトロン装置導入についての具体的な検討は、1985年頃から開始され、1987年7月にはサイクロトロン本体の機種を住重製の930型とすることに決定した。1988年10月から住重の新居浜工場において、まずサイクロトロン本体の磁場測定が開始され、翌1989年の3月まで継続された。同年4月にはベルギーのIBA社において、ECRイオン源のイオン生成試験が行われた。1989年の10月からR F系の特性試験やパワーテストが行われ、1990年の3月にはサイクロトロン本体の最終工場立ち会い試験検査、4月には制御系の総合試験が行われた。

引き続いて1990年5月から、サイクロトロン装置搬入のための準備作業および工事が、現地の高崎研究所サイトで開始された。6月には、計画通りサイクロトロン装置の搬入が始まり、最初にまずサイクロトロン本体(ヨーク部分)の搬入が実施された。6月にはイオン入射系とビーム輸送系の一部(主にビーム振分室部分)が、7月にはイオン源系が相次いで搬入された。9月には

ビーム輸送系偏向電磁石の試験検査後、各イオン室部分の機器が順次段階的に搬入され、それぞれの据え付け・調整等の作業がこれらに併行して行われた。

1990年の11月には、イオン源、イオン入射系およびサイクロトロン本体系の据え付け工事がほぼ終了し、12月からは個別に各機器・装置の調整等が開始された。1991年の1月には、電源等の通電試験などが行われるとともに、ECRイオン源の調整および現地ビーム生成テストなども再開された。同年3月の初旬から注重によりサイクロトロン本体の調整運転が行われ、3月17日（日）18時53分に $^4\text{He}^{2+}$ 、50 MeV（ハーモニック数：2）でのファーストビームの引き出し（約25 nA）が実現された。

さらに各種のイオンビーム保証値を満足するためのビームテストが約7ヶ月間にわたって継続され、同年11月末には正式に原研側に引き渡された。原研側では調整運転を経て、1992年の3月には試験的に実験利用者にビーム提供を開始した。その後いくつかの新しいイオン種についての加速試験も加えながら、同年9月より24 hの本格的な連続運転に移行している。

Table A1 原研AVFサイクロトロン装置の主要緒元・性能一覧表

サイクロトロン本体		AVF型 住友重機工業製		930型		サイクロトロン引き出し電流(実績値)	
K値	110	H^+		10	MeV	10	e μ A
セクターナンバー	4			20	MeV	6	e μ A
最大平均磁場(引き出し半径)	1.67	T		45	MeV	30	e μ A
主磁石重量	9.2.3	cm		70	MeV	5	e μ A
主トリムモニタ数	2.1.5.6	mm		90	MeV	10	e μ A
主トリムモニタ数	2.2.9	ton		100	MeV	11	e μ A
対	1.2	対		150	MeV	41	e μ A
度	8.6	kV		200	MeV	21	e μ A
電圧	6.0	kW		500	MeV	5	e μ A
角度	1.0.	6 ~ 2.2.	MHz	1000	MeV	20	e μ A
電圧	1.0.	6 ~ 2.2.	MHz	2000	MeV	100	e μ A
デイテイ大RF出力	10.	~ 10.	$\lambda / 4$ 型、シヨート板方式	36Ar ⁸⁺	MeV	2.	e μ A
周波数範囲	6	~ 6	$\lambda / 4$ 型、シヨート板方式	40Ar ⁸⁺	MeV	2	e μ A
周波数範囲	~ 6	~ 6	$\lambda / 4$ 型、シヨート板方式	40Ar ¹³⁺	MeV	10	e μ A
共振器				84Kr ²⁰⁺	MeV	10	e μ A
加速ハーモニックモード							
(M:質量数、Z:荷電数)							
外部ビーム輸送系							
主ビームコース数						8	本垂直ビームコース
副ビームコース数						5本(4本は垂直ビームコース)	
照射方式の特徴							
(1) 大面積均一照射							
軽イオン							
重陽子(D)							
(2) パルス照射							
チヨッピング方式							
パルス型 + 正弦波型							
(イオン入射系)(ビーム輸送系)							
最小パルス幅							
パルス間隔							
制御方式							
計算機制御							

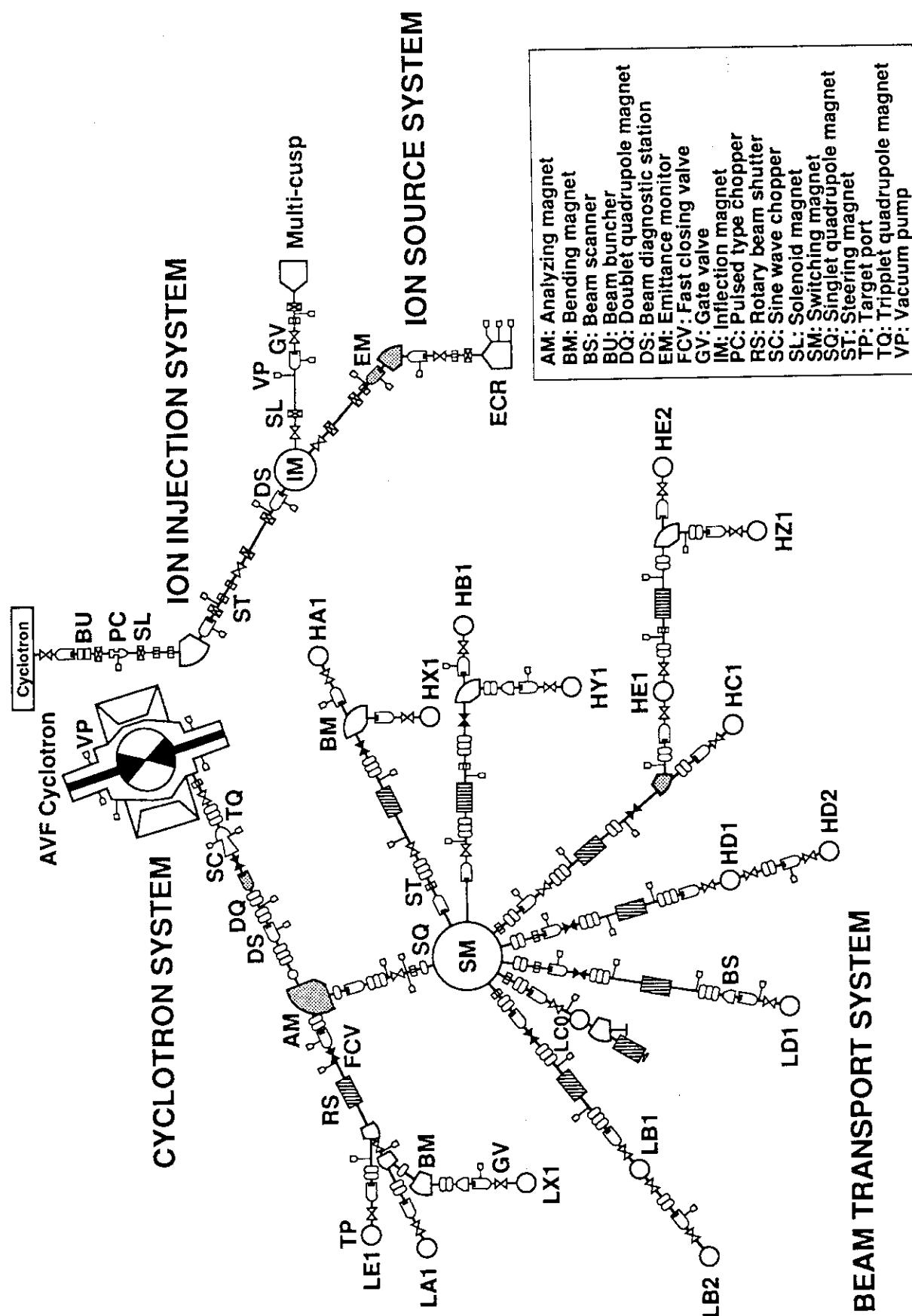


Fig. A1 原研 AVF サイクロトロン装置の全体構成模式図

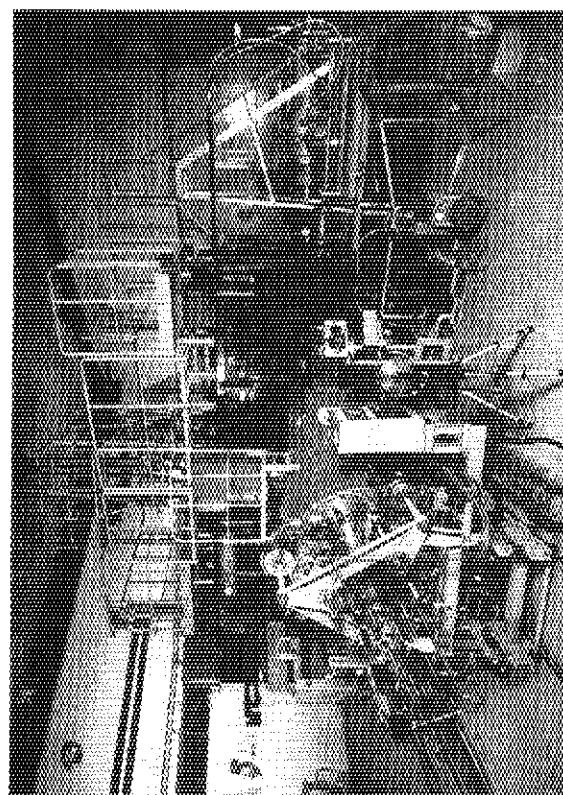


Photo. A2 原研AVFサイクロトロンの外観 (No.1
共振器側から)。

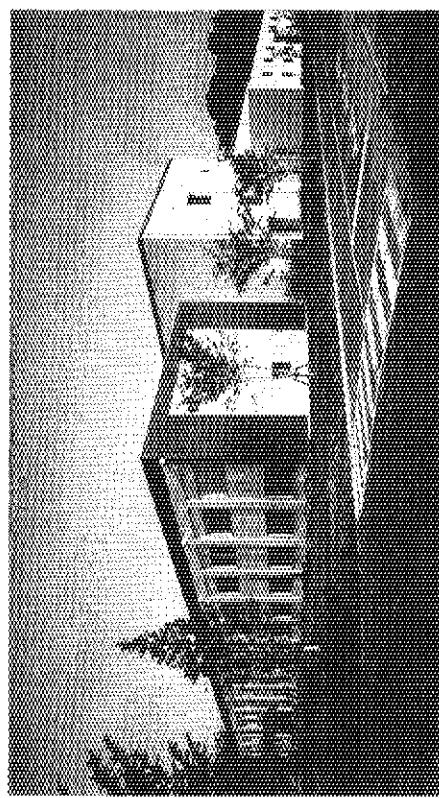


Photo. A1 TIARA施設の全景。手前の建物がイオン
ビーム研究棟、後方がサイクロトロン棟(Fig.
1A中の方位置記号方向で北側からの写真)。