

超大型加速器施設の交流電源の設計と建設

藤縄 雅*

Design and Installation of Electrical Power Supply for Super Sized Accelerator Facility

Tadashi FUJINAWA*

RIKEN NISHINA Center for Accelerator-Based Science's RI Beam Factory (RIBF) which succeeded in extracting first beam on December 28th, 2006 as per scheduled, is currently under service for nuclear physics experiments. RIBF has 6 accelerators of which the main accelerator is the world's biggest and most powerful superconducting ring cyclotron (SRC). We will report on the alternative power source for RIBF, especially for the main transformer (TR) with 66/6.6 kV 25/30 MVA which has double capacity specifications; MV/LV TR's windings for multiple-phase rectifications; all direct connecting type motor starters including 315 kW cryogenic system compressors, which enable a quick start and an efficient restart. They are also more reliable and economical than reactor and/or Y- Δ starters, and power supply to the existing facility is via the current-limiting reactor with a capacity of 9 MVA.

We actively took into consideration the environmental management for the factory.

Keywords: Double capacity transformer, Multi phase rectifiers, Motor starting system, Current-limiting reactor, Environmental management

1. はじめに

理化学研究所（以下理研）仁科センターのRIビームファクトリー（以下RIBF）は世界最大最強の超電導リングサイクロトロン（SRC）を中心とした加速器施設で、2006年12月に予定通り初ビームに成功した。その後世界を冠絶した核物理実験装置として順調に新アイソトープ実験を行いすでに多くの成果を各方面に報告している。加速器施設は、ご存知の通り多くの電力消費を伴い電力供給の安定の下に成立する設備である。我々はRIBFの建設に当り、交流電源に対して、計画、設計、製造、現地組み立てを加速器本体同様の努力を払い、加速

器施設として多くの特長あるシステムを構築し、順調に稼動している。今回その詳細を、本誌上で報告する。

Fig. 1に理研全体を含む単線結線図を示し、**Fig. 2**にはRIBFの鳥瞰図をしめす。

2. 特別高圧受電

理研和光本所は東京電力（以下東電）より66 kV受電にて電力の供給を受けている。

当初RIBFが計画された時には、その消費電力の大きさより、154 kV受電でなければ、東電より電力の供給が受けられないとの話があったが、熱電併給装置（Cogeneration system：以下CGS）の導入により、66

*日本大学生産工学部電気電子工学科非常勤講師，理化学研究所仁科センター技師

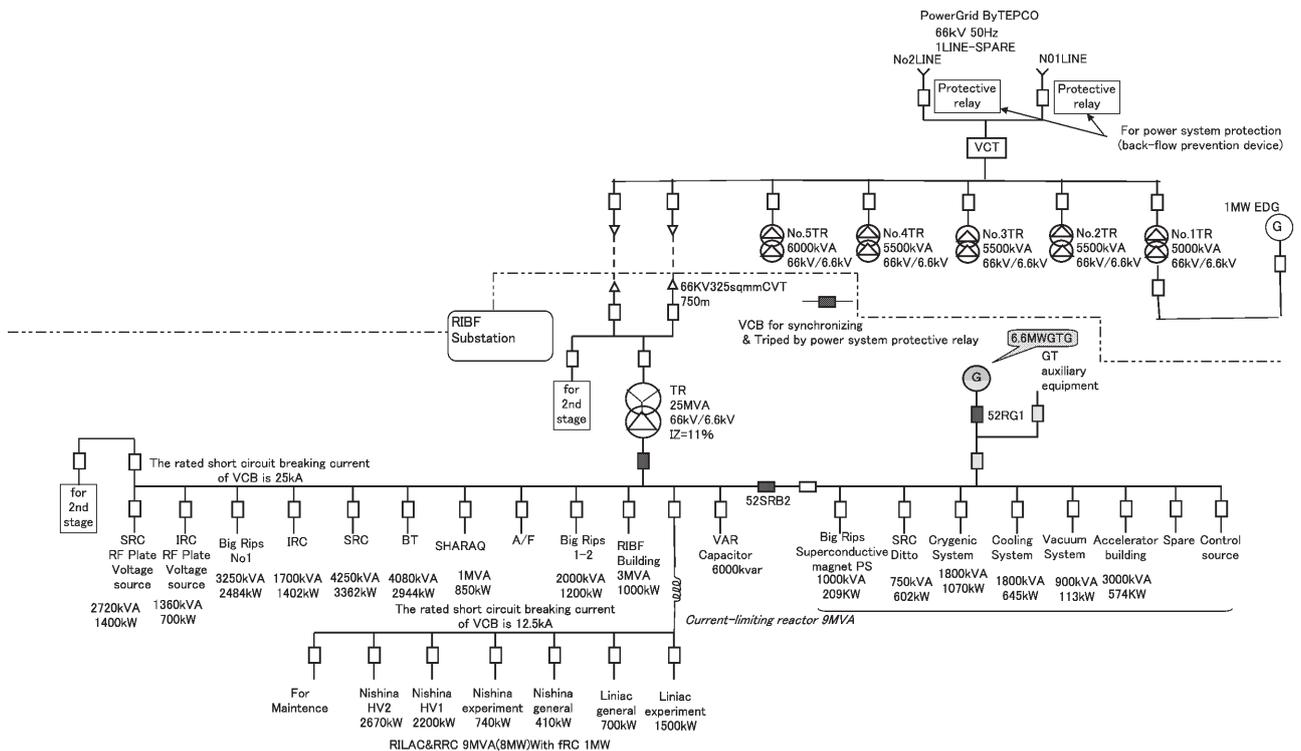


Fig. 1 Single line diagram.

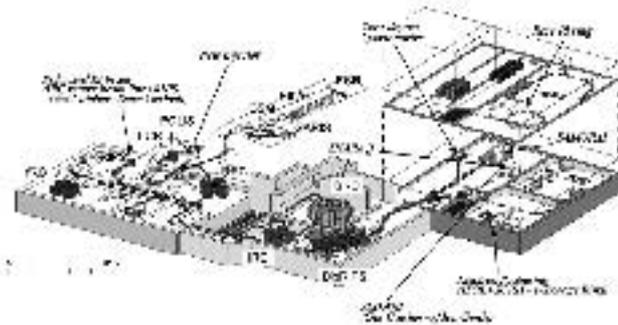


Fig. 2 Birds-eye View

kV 受電で得られる範囲の電力は東電より購入し、東電より供給不能の電力は CGS にてまかなう方針を決め、154 kV 変電所の建設を回避することが出来た。154 kV 受電は東電内の送電ロスが少ない分電力料金単価が安いですが、変電所建設に 20 億円強の費用が掛かり、大きな敷地面積が必要で 154/66 kV 変圧器の変換ロスを考えると、避けるべき設備である。一方 CGS は東電が停電等のトラブル時には 5.2 MW の無停電装置 (UPS) として働く機能を持つ。本装置の詳細は別の機会に解説する予定である。

理研と東電の境界は西門近くに位置する特高変電所である。そこに仁科センター用にガス絶縁変電所 (以下 GIS) を増設し、RIBF 棟屋上に建設した第二特別高圧変電所と呼ばれる専用変電所とは地中線で接続されている。

地中電力ケーブルは、架橋ポリエチレン絶縁 (以下 XLEP) のトリプレックスケーブルである。1 回線で将来

の負荷増強分をまかなえる導体断面積 325 mm² を選定し、最大 50 MVA の電力を供給できるものである。

2 回線の内 1 回線は予備である。また電線は 750 m の長さを中間接続のない一本物を採用し、信頼性の確保に配慮した。

第二特別高圧変電所

RIBF 加速器棟の屋上に、RIBF 専用第二特別高圧 (特高) 変電所 (Fig. 1 中の RIBF Substation) を建設した。

① ガス絶縁開閉所

特高変電所は、ガス絶縁母線と真空遮断器 (以下 VCB) を組み合わせた GIS であり、VCB はガス遮断器 (GCB) に比較して、保守性、省スペース、経済性に優れる上、温室効果ガスを使用しないという利点がある。

② 主変圧器

66 kV を 6.6 kV に変電する変圧器は、内鉄型自冷式 25 MVA の容量を持ち、CT やタップチェンジャーを交換しなくとも将来冷却ファンのみを増設することにより、30 MVA に増量できるように計画した二重定格である。

変圧器には理研を含む系統の電圧変化と RIBF の負荷変動に対応する自動タップチェンジャーを装備し電圧変動に対し自動的に追従できるものとした。Fig. 3 に GIS と主変圧器をしめす。

加速器の電源の仕様は受電電圧変動の許容値が ±10% である。また商用電圧の変動も ±10% が法律で許容されている。電圧変動要素に変圧器の %IZ (パーセントイン



Fig. 3 Main Transformer and GIS.

ピーダンス)がある。

例えば10%IZの場合、変圧器が定格電流(容量)を流した時に、無負荷状態に比べ10%の電圧降下を起こす特性和理解すれば良い。%IZが少ない事は、電圧変動が少ないことである。このため%IZ値が少ない程よいように思われるが、この場合は、設備の短絡事故電流が大きくなり、大きな遮断能力を持つ遮断器や短絡事故電流による磁力に打ち勝つ母線強度、そしてケーブルサイズが大きくなり、設備の価格と床面積に影響を与えるものである。また、CGS発電機も事故時には、事故電流の供給源となる。つまり変圧器の%IZは、全ての電気品を考え決定する必要があった。著者らは検討を重ね、経済性と加速器電源の要求より変圧器%IZを11%で設計し、製作誤差を加味しても事故電流が25kA未満に収めることとした、ちなみに20kAでは%IZが22%となり電圧変動が大き過ぎ、30kAでは床面積の増大と、経済的に成立しないことが明らかとなったためである。

Fig. 4にインピーダンスマップを示す。

この結果求められた短絡電流は22.43kAのため、遮断器定格は、25kAが最適であることが確認できた。

③ 電線サイズの選定

上記短絡事故電流が決定したため、電線の短絡事故に耐えられる最小サイズの選定を行った。

以下電線サイズに係わる式は全てJCS第168号E(1995)日本電線工業会規格 電力ケーブルの許容電流による。

銅導体XLPE電線の許容短絡電流は次の通りである。

$$IF = \sqrt{\frac{JQA}{arts}} \times \sqrt{\log_e \frac{210.0025}{T1-19.997}} \quad (1)$$

但し

A : 導体断面積 (mm²)

ts : 事故継続時間。ここでtsは保護継電器を含めた事故検出から遮断までの時間: 0.125秒

α : 20°Cにおける導体の温度係数 (0.00393)

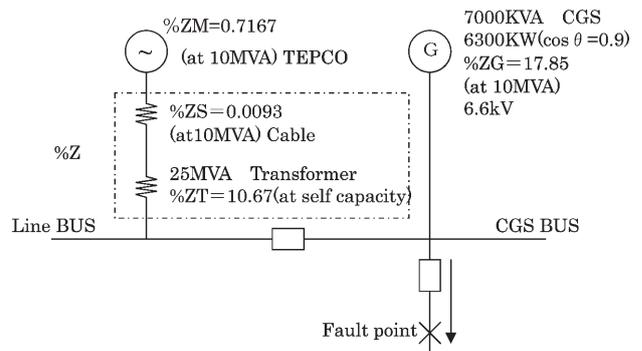


Fig. 4 Impedance MAP

r : 20°Cにおける交流導体抵抗 (Ω/cm)

J : ジュールの定数 (4.2)

Q : 導体の単位体積あたりの熱容量 (0.81 cal/cm²°C)

$T1$: 短絡前の導体温度: 次式より求める。

$$I = GF \sqrt{\frac{T1 - T2}{n \cdot r \cdot Rth}} \quad \text{これを变形して}$$

$$T1 = T2 + \frac{n \cdot r \cdot Rth \cdot I^2}{GF^2} \quad (2)$$

ここに

$T1$: 導体温度

GF : 低減率

n : ケーブル心数

$T2$: 周囲温度

th : 全熱抵抗 (°C·cm/W)

本式を用い60mm²の最大負荷であるSHARAQ (Spectroscopy of hadronic systems with radioactive quantum beam)用1000kVA電源について検討した。

$$P = \sqrt{3} \times I \times E \quad \text{より}$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \div E} = \frac{1000}{6.6 \times \sqrt{3}} = 88(A) \quad (3)$$

これを導体温度の計算式に代入すると $T1$ は54.9°Cとなり、短絡容量は25kAまで対応可能で、RIBFの高圧最小サイズは60mm²と算出された。

④ 高圧配電盤

第二特高変電所の高圧配電盤はJEM規格の金属閉鎖型を採用し、一般のJIS品に比べ安全性が向上している。25kA VCBは2段積みとし、省スペースに効果があった。

東電停電時にCGSを安全に単独運転に移行させる超高速遮断器は、検知から遮断までわずか0.02秒(1サイクル遮断)であり現在入手できるものとしては最速を誇る。

高圧配電盤と主変圧器の間は大電流の為ブスタクトで接続されている。

⑤ 既設への給配電

Fig. 2鳥瞰図の左側の建物は約20年前に建設された、直線加速器、AVFとRRCと呼ばれる各種加速器が既存



Fig. 5 Current-limiting reactor.

の設備として存在している。この設備と仁科記念棟に代表される既存の居室への電力供給は、西門近くの変電所から 6.6 kV ケーブルで送電していたものを止め、第二特高からの給配電を計画した。ここで問題は、既設の特高変圧器は Fig. 1 の右上に示す如く 5 MVA 程度であり短絡事故電流が少ないため、遮断器を含む配電盤定格が 12.5 kA であり、第二特高より給電した場合、既設内の短絡事故時には遮断不可の上、母線強度他が不足する点にあった。

そこで、Fig. 1 と Fig. 5 に示す如く 9 MVA の限流リアクトル (Current-Limiting reactor) を第二特高に準備し、限流リアクトルを通じ既設に給電することにより、短絡事故時でも事故電流が 12.5 kA 以下になるように配慮した。

限流リアクトルと既設への配電盤の接続も信頼性が高いブスタクト方式を採用した。

⑥ 力率改善

第二特高には、力率改善を目的とした進相コンデンサ 1000 kvar が 8 台準備されており今後必要に応じ後 2 台、計 2000 kvar の追設が可能となっている。特高受電は 85% が基本であり力率を 100% に保つことによって、理研の基本料金 1533 円/kW 月が 15% 割引になっている。

⑦ 遠方監視・制御電源

全ての高圧配電盤の遠隔監視と操作は仁科記念棟にある「CGS 中央操作室」で可能であり、運転員が一年中監視業務を行っている。

新設の交流電源用操作電源は、蓄電池内蔵の直流 110 V であり、停電時でも安全に操作作動が可能である。

3. 電磁石用交流電源

RIBF 棟地下 1 FL が「電源室 2」であり、ここに高圧/低圧変電配電盤が納入されている。

ちなみに地下 2 FL は「電源室 1」でこちらは磁石用 DC



Fig. 6 MV/LV Switchgears in electrical room 2.

電源が配置されている。

この交流電源の特徴は次の通りである。

- ① 理研の低圧は三相 415 V 三相 210 V 単相 210/105 V である。
- ② 変圧器は乾式モールドタイプであり、VCB とあわせ可燃物がないため、炭酸ガス消化設備等が不要で、大型消火器のみの対応で良く、メンテナンスも含め経済的である。
- ③ 「電源室 2」の電気容量は 18 MVA でこれは和光消防管内 (和光市、朝霞市、新座市) で一部屋として最大である。Fig. 6 に設置状況を示す。
- ④ 予算年度の関係で建屋の引渡しから装置完成までの時間がなく、現地施工期間が 11 日間と極めて短い間に搬入、据付、配線、諸試験と高圧受電までを無事終了した。本工事には一般には一ヶ月程度の期間が必要であるが 24 時間操業することで、必要時間数を確保。さらには Operation research 手法を駆使し、工程管理と品質管理に留意した。
- ⑤ 上記工事期間には 50 面以上の分電盤の据付と He 冷凍機系電源 (2.3 MVA) と冷却系高圧配電盤 (1.95 MVA) 及びモーターコントロールセンター (MCC) 2 郡、納入済みの直流電源類の搬入据付も含まれる。
- ⑥ 変圧器容量を等分に分割し、その巻き線を Y- Δ と Δ - Δ の 2 種とすることにより、多相整流と同様の効果を持たせた。一般には 1 MW 以上の半導体整流装置は高調波を抑制するために、三巻き線方式の変圧器を用い 12 相整流としている。RIBF では全ての 3 相変圧器の巻き線を交互に Y- Δ と Δ - Δ とすることで 12 相整流と同じ効果を得 5 次と 7 次の高調波を抑制した。当初は高調波対策としてアクティブフィルタを検討したが、実績は 6 kV 母線で最高で 10 A 未満の高調波電流より不要との結論に達した。Fig. 7 に IRC (Intermediate-stage Ring Cyclotron) の 750 kVA 変圧器 2 台例をしめす。

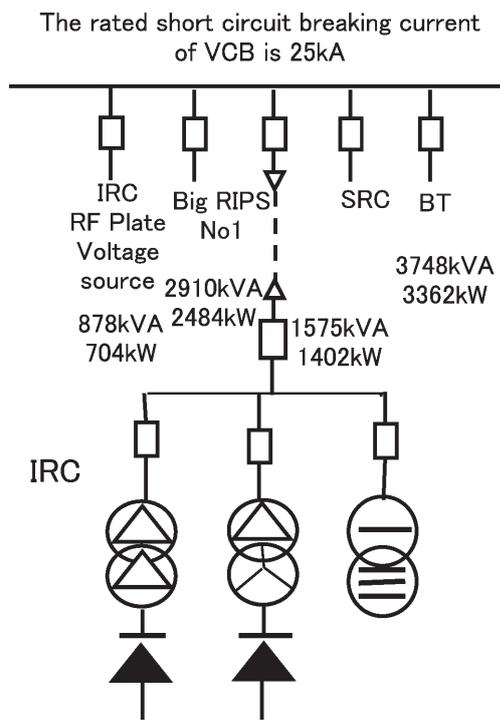


Fig. 7 Transformerwindings

Fig. 7はIRCであるが、BT (Beam transport lines), SRC, Big-RIPS (The in-flight radioactive isotope beam separator) も同様に等分割してある。

- ⑦ 既設の仁科・リニアック変電所に比較して面積は半分以下、容量は倍以上と密度は4倍のうえ、遮断器の定格は2倍であり、高性能をコンパクトに収納している。
- ⑧ 予備フィーダーを用い、2005年に竣工した実験棟内実験機器用に2MVAの交流電源を増設。2007年にはSHARAQ用交流電源1MVAを増設した。

4. 電動機起動方式

RIBFにはHe圧縮機(315kW 高压電動機)4台を筆頭に、冷却系を主に、70台を超えるポンプ用電動機があるが、全て、直入方式をあえて選定した。

国土交通省は高压電動機にはリアクトル起動、低压電動機にはY-Δ起動方式を推奨している。

国交省方式は、起動電流が少ないため、起動時に母線の電圧降下を起こし難い利点があるが、起動時間が長くなる、その間の効率、力率が悪い、起動装置が高価であり、構造が複雑な分故障が発生する確率が高い。瞬時電圧降下等によるトリップ時に再起動に時間がかかる等の問題がある。

Fig. 8にリアクトル起動方式を示す。

図の上段は停止状態で、点線に囲まれた部分が起動装置である。起動装置内には限流用リアクトルと高压スイッチ(VCS)が2個格納されている。中段は、起動状態を示す。リアクトル上流にあるVCSが入り、電動機の起

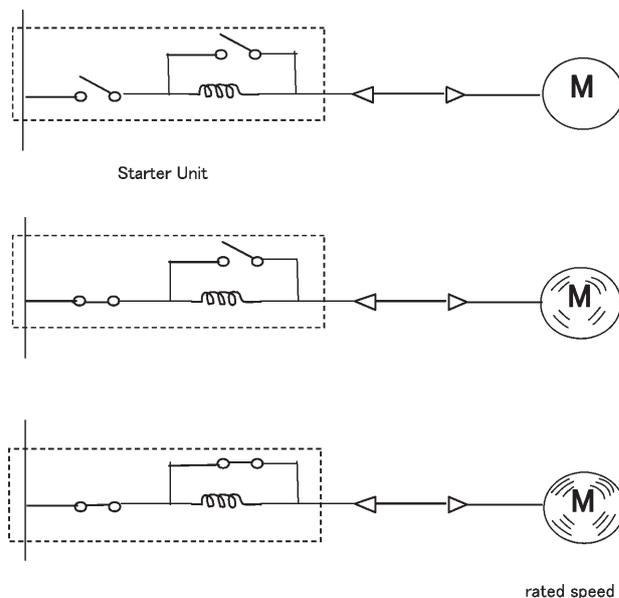


Fig. 8 Reactor starting system

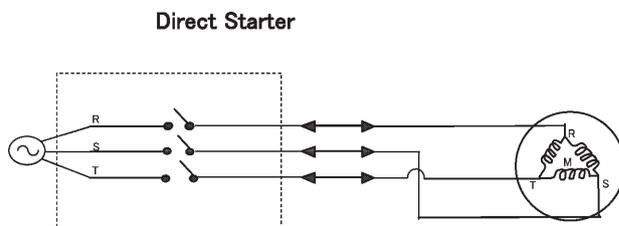


Fig. 9 Direct starting system

動電流は直列接続されたリアクトルを含むインピーダンスとなり、電流が少なくなりその分起動トルクが減少する。

下段は定格運転時である。もうひとつのVCSが投入され、リアクトルが短絡されることにより電流は直接電動機に流れ込む。

Fig. 9は直入起動方式である。

問題とされる直入の起動電流について計算する。

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} E \times \cos \phi \times \eta} \times 6 \quad (4)$$

ここで $P=315 \text{ kW}$, $E=6.6 \text{ kV}$, $\cos \phi=0.9$, $\eta=0.95$ とすれば,

$$I = \frac{315}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 0.9 \times 0.85} \times 6 = 216 \text{ A} \quad (5)$$

となり、変圧器の定格電流は2187Aより起動電流は定格電流の十分の一以下である。変圧器の%IZより起動時母線には変圧器単独運転時に1.07%の電圧降下が発生するが、無視できる範囲の上、CGS7MVAもあり実質電圧変動は無いに等しい。これらよりリアトル起動方式を採用する理由は見出せない。

冷凍機メーカーは当初320kWの電動機容量とリアクトル起動の承認申請をしたが、IECとJISには320kWの規格がないことより理由を質問した所、高压電動機は

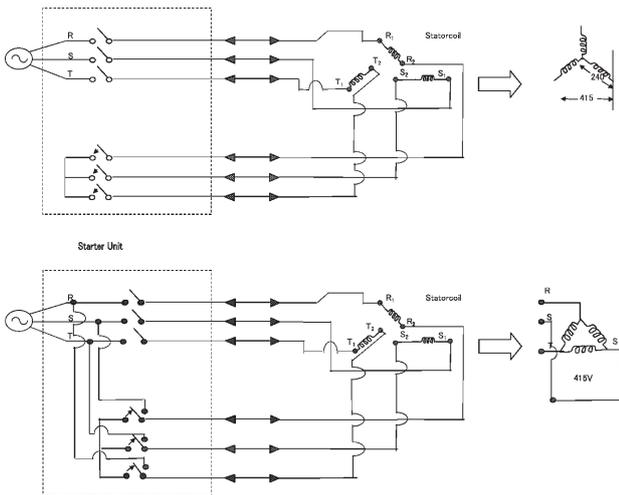


Fig. 10 Y-Δ Starter

注文品であるから、規格には拘らないとの話であった。調査の結果、容量選定の過程に安全率を多重に掛けており、実績表よりも矛盾があることを指摘し規格品の 315 kW を選定した。

実際の運転では入力 は 300 kW 程度であり、実負荷は 285 kW 程度と計算される。

次に低圧電動機の起動方式について、Fig. 10 にて解説する。Y-Δ 起動方式は起動装置と電動機を 6 芯の電線で結ぶ。(一般には 3 芯 2 本) 起動時には Y 結線で、各巻き線には定格電圧の $\frac{1}{\sqrt{3}}$ が印加され、その分電流が少なくなる。その後、Fig. 10 の下段に示す如く、起動装置で巻き線の切り替えを行い Δ 結線となり定格速度で運転される。本装置は構造が複雑高価で、電線長が 2 倍となり、送電ロスが 2 倍となる欠点を持つ。

一方直入方式は、Fig. 9 に示す如く極めてシンプルで、経済性、信頼性に優れ、十分な変圧器容量があれば全く問題ない。

そもそも、理研の監督官庁は文部科学省であり、電気に係わる監督官庁は経済産業省から考えても、加速器用電動機の起動方式を国交省推奨タイプに準拠する理由が見出せない。

RIBF における最新の起動装置は、モーターコントロールセンター (MCC) を用い、それは、電磁接触器で開閉し、過電流保護はサーマルリレー、短絡保護は MCCB (NFB) を一つのユニットに収めてある。遠方操作と監視には Control data link net work (CDL) を用いている。尚 RIBF では騒音対策上電動機は全面的に 2 極をやめ、4 極を採用している。

5. 環境対策

① RIBF の電気品は時代を先取りした環境対策に心がけている。電線類は、原則として PVC をやめ塩素フリーな、ポリエチレンシースの Environment manage-

ment cable (EM) を採用している。

② 変圧器は高効率変圧器を使用しており、最新の SHARAQ 用 1 MVA は、定格の 40% 負荷時が最高効率 99.25% であり、定格負荷時には 98.96% と常に高い効率での運転が可能である。

③ 電動機も同じく高効率を採用しており、最新導入の 415 V 37 kW 4 P では普通型 92.45% に対して 93.38% を誇っている。

電動機の消費電力は次式で表わされ、出力 (37 kW) ÷ 入力 P_i が効率となる。

$$P_i = \sqrt{3} \times E \times I \times \cos \phi \quad (6)$$

高効率 H 型と普通型 J 型の要目を Table 1 に示す。

Table 1 Motor Specifications

Type	E(V)	I(A)	Cosφ	Pi(kW)	Loss(kW)	Efficiency
H 37 kW	415	63.0	87.5	39.62	2.623	93.38%
J 37 kW	415	64.4	89.7	40.02	3.021	92.45%

高効率電動機の塗装色は各社それぞれ異なり、Gold Motor や Black Motor 等多彩であるが、省エネを進める上で普通電動機と高効率電動機の違いが望ましい。Fig. 11 は高効率 Gold Motor を示す。



Fig. 11 High efficiency motors.

6. その他の電源

放射線管理用には 20 kVA 5 分定格の無停電電源装置 (UPS) を準備し、CGS と非常用ジーゼル発電機より 2 重バックアップを行うことで万全を期している。

実験用計測電源には磁気増幅器負帰還自動電圧調整機能付ノイズカットトランスである、50 kVA Automatic voltage regulator (AVR) を 5 台準備し、配線材はコルゲートアーマードケーブルを使用しノイズトラブルを根絶している。

7. 経済性

Fig. 12 を参照願いたい。電気銅の市場価格の最高値と最安値を年毎にグラフで表したものである。RIBF 建設時の 2001 年から、2004 年にかけて、電源と電線類で銅を安価で 400 t 以上購入している。鉄及び珪素鋼板も同様な値動きをしており、大変運が良かったと言える。2007 年度購入では予算不足が明らかである。全ての電気品は、高効率機器の導入で省エネに努めている。

さらには、東電との夏季操業調整期間は加速器を停止するのみでなく、CGS を最大出力で運転し、理研全体の受電電力を最小とすることで、数千万円に及ぶ割引を得ている。すでに説明した様に、力率割引も得ている。こ

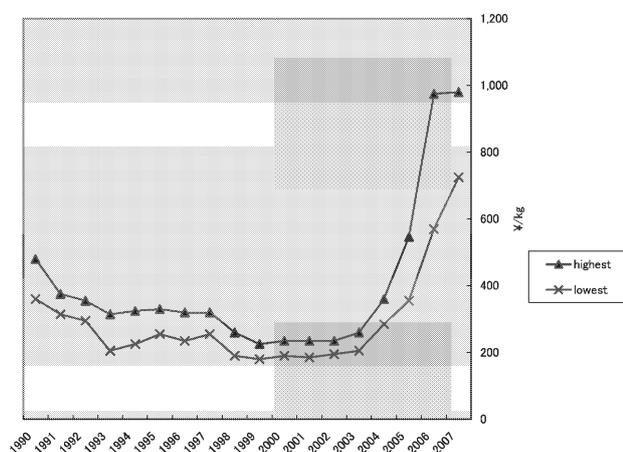


Fig. 12 Electrical copper price

れらより極めて経済性の高い運用と自負するものである。

8. まとめ

RIBF の交流電源は他の加速器施設には見られない多くの特長（変圧器二重定格，多相整流，直入電動機起動方式他）を持ち，緻密な設計と高品質の製品及び現地工事の上に成立している。それぞれの機器は運転開始後トラブルなく順調に電力を供給しており，目標は十分に達成されたと考えられる。

また，環境性にも十分配慮した電源設備であることを報告して結びとしたい。

参考文献

- 1) T. Fujinawa, Y. Sekiguchi, K. Yamaguchi, H. Tokuka, Y. Takuma and Y. Yano Cogeneration system for RI beam factory. RIKEN Accel. Prog. Rep. vol 36 (2003) PP.310~311.
- 2) T. Fujinawa, Y. Sekiguchi, A. Sakamoto, H. Ikawa, M. Kase, and Y. Yano Electrical power supply system for RI beam factory. RIKEN Accel. Prog. Rep. vol 38 (2005) PP.269~270.
- 3) 藤縄雅 理研 RI ビームファクトリーにおける電熱併給設備 日本大学生産工学部第 39 回学術講演会 (2006-12-2) PP.53~56.

(H 20. 6 .10 受理)

- 1) T. Fujinawa, Y. Sekiguchi, K. Yamaguchi, H. Tokuka, Y. Takuma and Y. Yano Cogeneration system for RI beam factory. RIKEN Accel. Prog. Rep. vol 36 (2003) PP.310~311.

