

J-PARC/MR 主電磁石電源レビュー委員会報告書

2012年10月2日(火) 11:00-18:00

KEK つくばキャンパス 3号館 1階セミナーホール

2012.10.2

[委員]

嶋田 隆一 (東京工業大学 原子炉工学研究所)

佐藤 健次 (放医研/KEK)

熊谷 教孝 (JASRI)

熊田 雅之 (放医研)

安達 利一 (KEK)

末野 毅 (KEK)

神谷 幸秀 (KEK、委員長)

[委員会プログラム (案)]

0: Closed	11:00~12:00	
(昼食)	12:00~13:00	
1: J-PARC/MRの現状と今後	13:00~13:20 (15分+ 5分)	内藤富士雄
2: 副変換機を持つ対称化電源の開発		
	13:20~14:10 (40分+10分)	中村衆
(休憩)	14:10~14:30	
3&4: J-PARC MR 「新」電源の開発		
	14:30~16:00 (70分+20分)	栗本佳典、小関国夫
(休憩)	16:00~16:20	
5: Closed	16:20~17:20 (60分)	
6: まとめ	17:20~17:40 (20分)	神谷幸秀

[レビューの背景・目的]

本レビュー委員会の冒頭に、J-PARC加速器を担当している内藤主幹から、J-PARC加速器、特にMR電磁石電源の現状について説明があった。また、本レビューを行うことになった背景についても以下のような説明があった。

J-PARCにおいて、3GeVシンクロトロン(RCS)、及びMRのビーム強度の増強は、今後、5年間における最優先課題の一つである。RCS及びMRにおいて設計強度を実現するには、入射器であるリニアックの増強は必須であり、ビームエネルギーの181MeVから400MeVへの増強、ピーク電流の30mAから50mAへの増強を2013年度に実施する。その後は可能な限り早期に1メガワット(設計強度)のビームをRCから物質生命科学研究施設へ供給する。一方、MRにおける今後5年の目標は、T2K実験には速い取り出しにより750キロワット(設計強度)、ハドロン実験施設には遅い取り出しにより100キロワット以上のビームを供給することである。この目標を達成するために、高繰り返しと高い安定性を持つ電磁

石電源を実現する。並行して、ニュートリノ実験施設及びハドロン実験施設における素粒子原子核実験の将来計画を遂行するために、J-PARC加速器のさらなる高度化を検討する。ニュートリノ実験についてはマルチメガワットビームの実現を目指し、ハドロン実験施設についてはビーム強度の増強はもとより利用時間の大幅な拡大も視野に入れて、加速器の次期計画を策定する。

また、本レビュー委員会のミッションについて、内藤主幹から以下のように説明があった。

- 開発は小型試作機を実負荷に接続して原理実証が行われている段階です。今回は開発中の電源の現状をレビューワーの方々に説明し、今後の進め方に関するご意見を得たい。
- 特に、基本的な考え方や進め方で我々が見落とししている重要事項や考え違い等のご指摘をいただきたい。
- 次の段階へ開発を進めるにあたり、各電源の使い方に関しても示唆をいただきたい。
- 開発途中なので、電源の型式を絞り込むことは現時点ではしないつもりである。しかし、これについてもご意見を伺いたい。

そして

- 次回の電源レビューは来年度J-PARCの長期保守期間後を予定している。その時までには量産まで考慮した開発を十分に進めなければならない。

[レビューの Summary]

本レビュー委員会としては、J-PARC 加速器からの説明に基づいて、MR 電磁石電源の位置付け、レビューのミッション等について、以下のように認識する。

- J-PARC MRの性能アップ計画では、MR 主電磁石電源のアップグレードがキーポイントである。
- 一方、MR の最高エネルギーは、当面、30GeV として、電源開発を行う。
- 今回のレビューでは、基本的な考え方や進め方についてレビューを行い、電源の型式を絞り込むなどの提言は行わない。

レビュー委員会当日、電源開発を行っている二つのチームから現在の開発状況について話を聞いた。それに対する本委員会の総合的な評価は以下の通りである。

- 二つのチームによって行われた開発は、いずれも優れたものであり、一定の目標を達成し、成果を上げていると判断される。
- 特に、電源の実負荷を含めた実証試験が行われていることは評価に値する。
- さらに、KEKスタッフが自ら、または中心となって設計・開発を進めていることは、高く評価できる。

本委員会としては、上記のように現在の開発状況については高く評価するものであるが、今後、開発がさらに進捗し、それが J-PARC の性能アップにつながることを期待して、以下のように提言する。

- 今後は、電源製造メーカーとの折衝やコスト評価が重要である。その際、

性能とコストとのバランスをとる必要がある。

その他、付属施設、建物等に関連するものについても総合的なコスト評価が必要であろう。また、メーカーとの折衝やコスト評価は、加速器グループの責任者が中心となって行うべきであろう。

- **加速器グループの責任者（主幹等）のリーダーシップ、監督の下、組織的に開発を進めるべきである。**

現在までの開発は、設計・開発・試験のほとんどすべてに関して、開発チームの中だけで進められてきたような印象を受けたが、本電源の開発は J-PARC 施設の重要課題であるということに鑑み、また開発が次の段階に入っていくためにも、加速器グループの責任者の下に、進捗状況のチェック、開発方針の決定、さらには関連する折衝や調整等を行っていくことが必要である。

- **電源メーカーの協力を得る、または得るように努めるべきであろう。**

R&D 電源の開発や個別技術の開発であれば、研究者グループだけで行うことが可能であるが、数多くの部品から構成される電源の安定性を確保・保証し、実機の開発・製造を行っていくためには、豊富な実績と経験をもつ電源メーカーの協力を得ることが必要である。また、メーカーからの開発への積極的な関与を促すように努めるべきであろう。

- **電磁石電源は、システムの電力設計や負荷である電磁石系を考慮したトータルシステムとして考えるべきである。**

このことは、既に検討し、考慮に入れているようであるが、今後とも、常にこのことを念頭において電源開発を進めていく必要があるということ喚起したい。

- **フライホイールの導入も検討すべきである。**

かつては、フライホイールの導入が前提となっていたが、現在では、導入についてほとんど検討が行われていないとのことである。しかしながら、レビュー委員会当日でも議論があったように、コストを抑えた製造が可能であれば、フライホイールは長年の実績があることから、再度、導入について検討を行うべきである。

- **コンデンサによるエネルギー貯蔵方式を採用する場合には、長寿命等の信頼性の高いフィルム・コンデンサを開発することが重要である。また、大容量コンデンサ・システムの設計・開発においては、短絡事故や故障対策等に特段の注意を払うことが必要であろう。**

現時点では、高い繰り返しで長寿命をもつコンデンサはまだ開発中の段階にあるとのことであるが、このコンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式を採用すると、信頼性の高いコンデンサの開発が重要な課題である。このためには、コンデンサ・メーカーとの密な連携・協力が不可欠であり、これについても加速器グループ責任者のリーダーシップを期待したい。

- **繰り返しの増加に伴う負荷への影響（電磁石への渦電流の影響、チェンバーの渦電流によるビームへの影響など）**

このことについては、レビュー委員会の場でも指摘があり、また以下の各委員からの意見・コメントの中にも指摘があるので、それを参照されたい。

- なお、今後、電源開発が十分、進んだ段階で、再度、レビューを行うのが適切であると判断する。

J-PARC 加速器でも、当初から再度、レビューを行うことを予定しているとのことであるが、本委員会としても、それを推奨することから、ここに付記しておく。

[各委員からの意見・コメント]

各委員から後日、寄せられた様々な意見・コメントを以下に列挙する。関係者は、これらのコメントを考慮に入れ、今後の設計・開発を進められることを期待したい。これらコメントの中には、既に検討済みと思われるもの、必ずしも委員全員の一致した意見ではないもの、場合によっては理解不足のために的確でないコメントが含まれている恐れもあるが、あえて、省くことなくすべてのコメントを掲載することとした。それは、関係者が今一度、この第三者的立場からのコメントを通読し、検討や開発に見逃しがいないかを再度、確認することを期待し、さらには、これらのコメントの中から新たなアイデアや指針が出てくることを望んでいるからである。なお、これらコメントから、委員の関係者への励まし、開発への高い関心と熱い思いを感じて頂ければ幸甚である。

- 既に、フライホイール付同期発電機は電力変動を緩和するコンベンショナルな技術となっている。その上、電力コスト、受電契約料金を低減する効果もあるので、どうしてもっと早く設置しなかったのか・・・電力料金の削減のために設置できたのではないか・・・という印象を受けた。フライホイール発電機の新設を、今、各省庁で募集している省エネ予算として位置づけ、別予算で要求するというのも一案であろう。原発問題で電気代が上がること、電力会社は風力や太陽光電力の参入で、系統の擾乱が問題だと憂慮していることもあり、その対策にもなる。
- 加速器を運転するということは電気系統の環境問題でもある。本当の意味でエネルギー削減とは言えなくとも、電気代の削減は広い意味で省エネと同じことである。オーストラリアでは、電力料金として、環境税、有効電力と無効電力、さらに歪み電力にも課金している。J-PARC がパルス的に数 10 MW を系統に返すのはこの歪電力と言えなくもなく、電力会社はお金を返すどころか、電力系統擾乱代金を徴収してくるようなこともあるかもしれない。今回のレビュー委で加速器のビーム・クオリティーにも電力系統の安定が重要であるということを確認した。新日鐵は、超薄板の製造は大分ではなく、君津でやると言っているが、それは系統の安定性の差によるものである。JT-60 では、系統と切り離れた状態で運転していたので、この系統の問題で運転精度が変わるようなことはなかった。この観点から言えば、加速器運転の学習制御には、系統から独立した電源が必要であろう。
- 今回の改造はビームの増強が第一であり、新しい電源開発へのチャレンジはプライオリティーが低いであろう。コンデンサ電力貯蔵方式加速器電源は部分的、試験的導入にとどめるべきではないか。この方式は CERN に先を越されているので、うまくいって当たり前で失敗したら笑われるであろう。現在、コンデンサ・メーカーは電気自動車用のコンデンサの開発で忙しく、自動車会社に振り回されている状況である。

- 民間では、電力会社との交渉や電力料金削減の検討などをエンジニアリング会社のようなところに、運転も含め、工場のエネルギーの管理・運用を丸投げで請け負わせている例もあるので、そのようなエンジニアリング会社に電力システム設計、施工管理、今後の運用も依頼してはどうか。
- フライホイール発電機は、例えば大型風力発電機の翼を鉄の円盤にして運動エネルギーを蓄積すれば可能となる。2.5MW 風力発電機が翼、タワー、半導体変換機、変圧器込みで2.5億円であるので、かなり安価にできるはず。2.5MW 風力発電機2基を J-PARC の構内に設置するというのでどうか。スーパーコンピュータの電力をグリーンにする研究を我々は手伝っているが、加速器を使った研究もグリーン度をとやかく言われる時代になるであろう。
- フライイングキャパシタ方式の回路は優れた回路であるので、今度の改造でぜひ使ってほしい。10年以上前、コンパクトな加速器の電源が必要だということで、重電メーカーと研究して磁気エネルギー回生スイッチを発明した。磁気エネルギー回生スイッチ (Magnetic Energy Recovery Switch: MERS) の元は、加速器電源からのニーズであった。すなわち、磁場コイルの磁気エネルギーを電源に返さずに、スイッチ内に貯め、次にコイルに返す、電源本体からは損失分だけの有効電力を出力すればよい、すなわち、広い意味で力率1にできるというものである。この回路は、パルスコイルには有効であるが、MR の大容量の電磁石コイルではどうなのかは現時点では即断できない。しかし、1秒間隔の運転は十分、パルスのと言えるのではないか。フライホイール付発電機をエネルギー貯蔵コンデンサと見なしてもいいのではないか。
- 私は、コンデンサ電源の危険さを実体験している。東工大の原子炉研で、MHD 発電用の1MJ 程度のパルス磁界コイル電源を建設するのを手伝っていて、充電テスト中に、それが起きた。電圧測定用か、電流測定用かの配線がふらふらして、それがコンデンサ電極間をブリッジしてしまった。この大短絡事故でオレンジ色の閃光が光り、大音響とともに、天井が持ち上がり、窓ガラスが7枚割れた。コンデンサ自体は壊れなかったが、怖かったという思いをしている。
- IGBT の時間遅れを補正して直列接続するなど、困難な技術に挑戦するのはよいが、大変ではないか。これは、IGBT メーカーでもなかなかできないということだと思う。手前味噌だが、MERS 式ソフトインバータは、半導体スイッチの遮断後の再起電圧上昇率が低いソフトスイッチングなのでおすすめである。なお、この MERS 式の ACDC 変換器については、論文がある。
- 当日のレビュー委でノイズに関連して対称接続が議論になっていたが、基本の接地設計がどうなっているのか疑問である。JT-60 では、接地と避雷の工事に数億円をかけ、基本に忠実にこれを行った。その結果何の問題も出ていない。J-PARC でも、この際、見直しを行ってはどうか。
- MR におけるビームパワーの増強には電磁石電源の高繰り返し化 (2, 6 秒から1秒へ短縮) が重要な要件の一つである。そのための課題を着実に解決し、一定の成果を得ていることは高く評価できる。しかし、この高繰り返し化の実現における目標設定が、どのような理由でなされているか、また電源以外の各種機器が、この性能実現に対応できて

いるかどうか等、システム全体の最適化がもっとも重要であると思う。その意味では、この全体像が明確でない状況で電源のレビューのみをすることはあまり適切ではないのではないか。

- できる限り電源システムの対称性を満たすという設計思想は、ノイズ低減の観点から適切であるが、高繰り返しでの加速器運転でもっとも重要な点は、ビーム損失である。この観点から、ビームが実際に感じる B と Q および S の磁場トラッキングエラーを所定の性能に入れることが重要である。この点に関しては、小関氏らの制御システムの研究開発は一定の成果を出しているとは判断されるが、実機への投入には、今後、実機システムを想定した（たとえば 12GeV-PS を用いた）長期連続試験によって信頼性、安全性を確保することが不可欠と思われる。また、制御特性のさらなる高精度化、および電力系統への電圧変動が重要課題であり、さらにピーク電力の抑制の観点からは、フライホイール等の導入による受電システムの安定化が不可欠と思われる。
- 1ppm の高い電流安定度をもつ電源を実現するためには、1ppm 以下の高精度電流検出器、磁場測定装置、磁場トラッキング測定器の開発が不可欠である。また、すべての変動を主電源のみで抑制することは合理的ではない。制御帯域を区分し、適切な方法で所定のビーム性能を実現することが重要である。また、空間電荷効果の影響が弱い低ビームパワーでの SX におけるスピル制御は一定の成果をあげているが、今後 SX のハイパワー化に向けて、詳細な検討が必須である。この点に関しては、電源の対称化と同時に電磁石、ケーブル、および建て屋背筋等の構造の対称化等、システム全体の検討が必要と思われる。

また、磁場の高安定化には電源電流の安定化の他に、真空チェンバー等の冷却水に起因する振動等による渦電流磁場のビームへの影響も要検討事項である。
- 一般的に R&D の段階から、実機段階に移行する際には、コストを考慮し、システムの簡略化、部品の見直し等で信頼性の低下が発生するケースが多いので、今後の実機の製作に当たっては、特にこの点に考慮して進めることが肝要である。
- 二つのグループの担当者とも電源開発には十分な実力を持っていると思われるが、システムをコーディネートすることの経験は豊富ではないと思われる。組織として未来を担う彼ら（若手）を適切にバックアップする体制の構築を望む。
- 電源・電磁石システムの観点からのコメント
 - ・電源には、微分 μ が効いてくるので、磁場の飽和が大したことがなくても、電気的なインダクタンスの飽和は大きくなるため、特にフィードバック系を設計するときには、このことを考慮すべきである。
 - ・そのため、インダクタンスの飽和を考慮して、定格運転時の電源（特にフィードバック系）の動作確認をすることを推奨したい。
 - ・もし既存の回路シミュレーションプログラムを使う場合には、 $V=d(L \cdot i)/dt$ となっているかどうかを確認する必要がある。
 - ・現時点では、定格運転での確認はできないであろうから、とりあえずシミュレーションで確認しておく必要がある。
 - ・ヒステリシスの効果も、もし考慮に入れるのであれば、磁場測定結果（時間依存磁場

の測定結果)から推定可能である。その際、磁場をハーモニック処理した方が多分、取り扱いやすいであろう。

- ・電磁石インダクタンスの飽和の様子は、もし磁場測定時に評価していなければ、toscaの計算結果から推定すれば良いであろう。

○ 電磁石本体に対する影響についてのコメント

- ・電磁石端部での渦電流損による発熱の検討を行うべきである。
- ・磁場の立ち上がり（立下り）の繰り返し周期に対する比が一定とするなら、渦電流損は立ち上がり（立下り）時間の二乗に反比例するので、たとえば、繰り返し周期が半分になれば、渦電流損は4倍となる。もし、冷却が黒体輻射のみによると仮定すれば、端部絶対温度は渦電流の1/2乗に比例することになる。
- ・現時点で、端部が少し暖かいということなので、温度を300 Kと仮定し、これを渦電流損からの寄与によると考えると（当然、鉄損からの寄与も考えられるが・・・）、周期が半分となれば端部温度は、およそ420 Kになる。ただし、ほとんどが鉄損の寄与となれば、これは過大評価となるが・・・。
- ・とりあえず、やれることとしては、実機でテストできるなら、速い立ち上がりパターンで直接、端部温度を測定する。もし、不可能なら、Elektraによる磁場計算：端部のステンレス板と鉄芯の端部（多分ギャップ長程度）のメッシュを注意して組み立てること。
- ・当日のレビュー委での話では、（私が作った磁石では経験はないが）電磁石中心付近でも比較的大きな渦電流磁場があるとのことなので、もしこれが事実ならば、コイル導体での渦電流損も評価する必要がある。これは、解析的に評価すれば良いと思うので、すぐできるはずである。
- ・もし発熱が大きいことがわかった場合、（鉄芯自体は特に心配ないであろうが）端部を接着していたり、絶縁材としてプラスチック系の材料を使っていたとすれば、検討が必要である。
- ・なお、この端部発熱については、四極磁石の方が深刻かもしれない。

○ 以前、武藤氏（MR電磁石の元担当者）から、繰り返しを上げる等のパターン変更時には東電側にも検討（有料）を依頼するとの約束が東電との間にあると聞いた記憶がある（これについては、関係者は把握していると思うが、50GeVの場合だったかも・・・）電力変動があると発電機の軸がねじれるため、ねじれによる劣化を検討する必要があるというような話であった。また、当時は福島原発の稼働が前提であったと思う。

○ 1次側の電力変動の抑制、電力代の軽減、電源価格が問題とのことであるが、これらは電源から見た負荷（ほとんどが電磁石）抵抗が大きいことが元々の原因である。負荷抵抗を下げるには導体のサイズアップもあるが、導体温度を下げるという方法も考えられる（銅は10°Cで約3%抵抗が下がる。）J-PARCの冷却水温度は30数°Cと聞いているが、12GeV-PSでは20°Cであった。ただし、冷凍機の電力が余分にかかるので、温度低減は電力代の節約にはならないかも知れないが、電力変動の抑制には効果がある。いずれにしろ、電力低減は、電磁石-電源のシステム全体で検討すべきであろう。

○ また同じ配付資料にある現行電源回路構成の図から求めると、負荷時定数が2.3秒とな

る。このような負荷に対して一秒以下で立ち上げるためには、フィードバックだけの制御では無理で、フィードフォワード制御が必要となる。小関氏らは既に検討しているようであるが、12GeV-PS 主リングで行っていた繰り返し制御も検討に入れてはどうか。また、(誤解があるかもしれないが) 小関氏らの方法では、フィルターの C への分流の補償及び過渡振動の抑制効果までは期待できないのではないかと。なお、試験用電源の負荷に使用される電磁石は負荷時定数が小さいことが多いので、実負荷への適用に際しては、注意が必要である。

- J-PARC MR の B 電磁石は最初、端板が鉄だったため、渦電流効果で電流に対して磁場の立ち上がりが遅れる現象(フラットトップとフラットベースでの測定)があり、端板を SUS に交換した(はずである。)それでも遅れはゼロではないと聞いている。確か Q は未対策のはず。よって、電流の追従性が完全でも、この効果は残ることになる。二つの開発チームとも、磁場の測定も行っているので、この効果も検討に入れていると思うが、ビームに対して ppm の精度を言うのであれば、なんらかの対策が必要であろう。
 - 両チームとも実機対応の高電圧化について、さらに多くの検討(中村氏らは副変換器の耐圧、小関氏らは多段にした場合にスナバレスで使用できるか等)が必要である。
 - 小関氏らが検討しているコンデンサの大容量化は、電力変動を抑制する上で面白いアイデアだと思う。既に電気 2 重層コンデンサを使用した大容量コンデンサの 6.6 kV 用瞬時電圧低下補償装置が市販されているが、この技術を応用してはどうか。
 - 小関氏らの試験では、学習制御の区間から減速部分を外しているが、減速部分もフラットベースでの偏差に影響するので、全区間でパターン制御する必要があるであろう。
 - 中村衆氏らのグループと小関国夫氏らのグループの 2 つの電源開発グループがあること、それも、若い人たちが核になっていることに感銘を受けた。
 - 私は、「対称 3 線方式」を「電源と負荷と配線の対称化+コモンモードフィルターとノーマルモードフィルター」と呼んでいて、それを実現するように勧めているが、それに準ずる回路方式になっている点で、「中村方式」も「小関方式」のいずれも納得出来るものである。即ち、いずれにおいても、「負荷と配線の対称化」は実現されていると思われる。ただし、「コモンモードフィルター+ノーマルモードフィルター」は「アクティブフィルター」によって実現されるようだが、負帰還制御信号として、2 つのモードに対する誤差信号が独立して用意されているのかどうかについては、レビューでは説明がなく、また、スライドにある回路図からも読み取ることが出来ず、判然としなかった。勿論、「負荷と配線の対称化」が完全であれば、コモンモードとノーマルモードとの結合をほどこことができ、コモンモードノイズの発生を最小限に抑えることができる。しかしながら、「電源」は「中線」に対して、時間的にずれた交直変換が行なわれているようである。結果として、「電源」の動作は対称化されず、コモンモードノイズの発生が避けられないであろう。従って、「負荷と配線の対称化」に些かでも乱れがあれば、「コモンモードとノーマルモードの結合が発生」し、両者の結合を通して、不可避的に発生したコモンモードノイズがノーマルモードノイズに転換する可能性がある。それによって、磁場の安定性やリップルが乱される可能性がでてくる。
- 以上のような予測可能な現象を緩和するためにも、コモンモードとノーマルモードの二

つのモードについて2種類の負帰還制御が必要と考える。このことについて、両開発チームとも確認することを望む。

- 「対称3線方式」は、直流出力側に採用されるべきであるというだけにとどまらず、交流系統にも採用することを推奨したい。この「交流系統対称方式」を採用すると、その中線は、直流出力側の「対称3線方式」の接地されている中線と一致させることが可能になり、その結果、交流系統の接地に紛れがなくなり、交流系統に流れ出すノイズも削減可能になる。それと同時に、落雷時の避雷対策のためのシステム設計が容易になる。
- 今回のレビューの対象となっている J-PARC/MR 主電磁石電源は、遅いとは言え、繰り返しを速めることに対応して、同時に、ノイズ削減を実現する必要があると考える。「対称3線方式」はノイズ削減に有効であるが、それが全てではないと思う。今回のレビューにおいて、二つの開発チームからの話の中で、「ノイズ削減の技術なり物理なりが語られていなかった」ことが不満として残る。何らかの仕様を設定して、試作機なり実機なりを作ってみて、その仕様を満たしていれば良しとするのでは、従来の電源の製作法と代わり映えがしないのではないか。極論を言えば、仕様を甘くすれば良いだけのことになる。これまでメーカーに電源を発注し製作したものの、その仕様が甘かったというか、甘くさせられて来たことが思い出されるが、二度と同じ愚を繰り返すべきではない。予算の無駄遣いを避けて欲しいと思う。
- なお、中村氏らのグループにしろ、小関氏らのグループにしろ、ノイズ退治の経験は多くはないであろう。これまでノイズは正体不明の代物とされており、その正体不明の代物を何とか退治しようとしてきた経験は貴重であると思っている。そこで、現場でノイズと格闘して来た人をコンサルタントにし、「ノイズ削減の技術なり物理なりを語る」ようにすることを提案する。
- 私としては、「弱電回路に絶縁アンプを使用しない基本設計」を推奨したい。私が HIMAC でサイリスタ電源の設計・製作に取り組んでいた頃、「仮想中点」という言葉と、「ノイズの非論理成分」という言葉を見かけたものである。私は、その昔に開催された加速器電源シンポジウムにおいて、「仮想中点」は有り得ないので、交直変換器である電源を2式直列につないで中点を設けるべきである、さらに、その中点に2本の主配線に対して3番目の線である中線をつなぐべきであるということを発表している。当時、「ノイズの非論理成分」はどこから発生するのかと考える中で、負帰還制御の弱電回路を含めて、回路構成が対称化されていないことに着目した。「電源と負荷と配線の対称化+コモンモードフィルターとノーマルモードフィルター」を「対称3線方式」と呼ぶが、負帰還制御の弱電回路もそれに倣う必要があるということである。「対称3線方式」の最大の特徴は、一点接地出来る中線が存在することである。負帰還制御の弱電回路も「対称3線方式」に倣うということは、全ての弱電回路のアースは、中線につなぎ込み、絶縁アンプを使用しないということである。実際、それを基本方針として、HIMAC シンクロトロン電源を設計した。その昔の電源では、絶縁アンプを多用し、そのアンプの基準を何処につなぎ込めば良いのかの試行錯誤を繰り返して、最良の基準を決定したものである。HIMAC では、そんな現場作業を避けたいと考えたが、実際、絶縁アンプを使用せずに済んだ。また、ノイズとしては 50Hz や 100Hz が現われ、相間不平衡や交流の周

波数変動がその原因であるとして良いことがわかり、「ノイズの非論理成分」は発生していなかったことが判明したと思っている。「ノイズの非論理成分」が発生したとして、それがコモンモードノイズであるのか、それとも、ノーマルモードノイズであるのかを判別する必要がある。しかし、判別出来たからと言って、それを潰す手段を持っていないといけない。それについては、既に述べたように、コモンモードとノーマルモードとに対する2種類の負帰還制御が必要であると考えられる。

- 小関氏らのチームが、J-PARC実負荷を用いて定格の1/15のパワーでリップルと追従性について目標に近い性能を確認したことは高く評価できる。しかし、一方において、当初のプロトタイプ電源では単一負荷でサブppmの性能を出していたのに、共振のある実機のストリングテストではリップル性能が3桁も悪くなっている原因が、定量的に評価しきれていないように思う。現在の設計のどこにその原因があるのか、定量的に明らかにしておくべきであろう。
- (分布常数回路である) 負荷のストリングテストとフルパワーテストを行う際には、負荷単体の周波数特性やストリングとしての負荷の分布常数回路の特性についての知見が必要となる。このことについて、開発チームは既に、磁石の交流特性、うず電流磁場の知見、ダクトのうず電流効果などの知見が必要となることに気づいており、五十嵐、染谷氏らのチームが磁場測定を始めている。しかし、磁場測定器の積分器のドリフト問題など、今後、測定技術の大幅な改善が必要となる。小関氏らのチームは高い精度(24ビット)の電圧測定システムを開発し、完成させており、電源回路要素については高い技術をもつと判断されるが、磁場測定の経験とノウハウがないと思う。この二つのチームを有機的に合体させて、測定精度を大幅に改善するような体制作りが必要である。
- 今回のレビューで報告された磁場測定やその改善方法は、精度の劣るサーチコイルを使った場合についてであったが、究極の精度はNMRによって実現されると考える。遅い取り出しで使われる4極磁石や6極磁石については、NMRによる高精度測定が望まれるが、今のところ、磁場の非一様性のために世界的に見ても、だれもこれを実現できていない。私は、この種の磁石の磁場測定法に関するアイデアを持っているので、これが実現される可能性があることを指摘しておく。
- フライホイールの概算見積について、佐藤皓氏の40億円と嶋田委員の5億円では、見積もりの開きが大きすぎる。その理由が大手と中堅以下の製作会社での違いであれば、中堅の会社によって5億円で製作をする場合には、ノウハウをもっている嶋田委員(東工大教授)の指導の下に、J-PARC側に専任者を配置することが必須と思われる。そのような体制が実現できたという条件が満たされてのみ、コンデンサ案との対案が成立するであろう。また高性能・低価格・高信頼性コンデンサーの開発は、エネルギー問題にとっても重要なテーマであるので、この観点からも当初目標の実現を目指した研究開発を支援することが望ましい。当面は、競い合って技術の向上をめざすことが望ましいであろう。
- 小関氏らの案は、幅広い新技術を展開していて中村氏らの案より好ましいと感じるが、電源技術の若手の育成は我が国の加速器技術にとって、極めて重要であるので、中村氏らの案は六極磁石電源に、小関氏らの案は其れ以外に採用すると、二者案ともに採用す

ることができ、望ましいことになると思う。

- 本電源技術は、癌治療用加速器への応用で社会貢献に寄与できる。この電源技術をがん治療用シンクロトロンに応用、展開できるよう応援したい。CERNはイタリアやオーストリアでの重粒子線装置の建設で大きな貢献をしているが、彼らに負けない大きな寄与がKEKには期待される。
- J-PARCには多様なユーザーがいるが、その中でもニュートリノグループは加速器のビームパワーに強く依存している。ニュートリノ・ターゲットは、加速器のターゲットでもあるので広く考えれば加速器に含まれるとも考えられる。ターゲット固有の問題として、大電流パルス電源以外にもニュートリノビームを如何に効率よく収束するかという重要な問題もあるので、一緒になって考えるべきである。その点、今回のレビューにニュートリノグループ関係者の参加があったことは喜ばしいことであった。
- 大強度の陽子ビームパワーをもつJ-PARCは、エネルギー問題、加速器駆動核消滅あるいは加速器駆動トリウム熔融塩炉などエネルギー問題にも貢献できる可能性が大きい。このような観点も盛り込んで、電源増強を検討していくことも考えるべきであろう。
- 電源開発を迅速かつ円滑に遂行していくために、また開発チームの負担を軽減するためにも、KEK及びJ-PARCは、現時点では不足していると推測される開発環境の整備（開発スペース、ユーティリティの確保、実負荷試験等の手配、スケジュール調整等）に努めるべきであろう。
- 本電源は、営業運転（利用実験）の施設で用いられる主要装置であるので、事前に可能な限り長期間の試験運転を行うべきである。現在の開発状況では、そのような試験を行う段階ではないかもしれないが、レビューでの印象では、この試験運転がそれほど重要視されていないように感じた。また、試験運転では、故意に故障を起こすことや故障を模擬するなどの試験や保護動作試験を十分、行うことが必須である（新しい技術を適用しようとする場合には、このことは特に重要である。）
- 本電源は、大型装置であるので、故障した場合、加速器運転が長期のシャットダウンに追い込まれる可能性がある。すべての部品を保守部品として確保することは予算的に無理があるであろうから、可能な範囲で、調達に時間のかかる部品を確保しておくことが望ましい。しかし、より重要なことは、故障や不具合が発生した時に直ちに対応できる体制や日常的な保守維持の体制の確立である。スタッフの体制ばかりでなく、メーカーの体制についても製造段階から考慮に入れておくべきであろう。
- 電力変動ばかりでなく高調波の影響についても調査、検討を行っていく必要がある。電力系統及び受電関係については、電力供給会社やKEK施設部との密な連携が必要になる。また、J-PARCの他の機器への影響や原科研の施設への影響についても検討が必要となるので、このための体制を整えておくべきである。
- 今回の電源増強では、どのような方式を採用するにしろ、電源棟、電源ヤード、ユーティリティの拡張が必要であろう。電源の仕様が固まらない段階で、これらの詳細を詰めることはできないが、これらの拡張には、各方面との事前の調整・交渉が必要であり、時間も要することを十分に認識して、開発を進める必要がある。