

## 加速器電源応用におけるエネルギー貯蔵方式の比較検討

### RESEACH FOR ELCTRIC POWER COMPENSATION OF THE ACCELERATOR MAGNET POWER SUPPLY

佐藤皓<sup>#,A)</sup>, 新富孝和<sup>B)</sup>, 秋田調<sup>C)</sup>

Hikaru Sato<sup>#,A)</sup>, Takakazu Shintomi<sup>B)</sup>, Shirabe Akita<sup>C)</sup>

A) KEK

B) ARISH, Nihon Univ.

C) CRIEPI

#### Abstract

Magnets Power Supply of the synchrotron are excited by a pulse operation, and then the load fluctuation should be a severe problem. An energy storage system, such as superconducting magnetic energy storage (SMES), flywheel generator so far are expected to protect the load fluctuation and the instantaneous voltage drop. RASMES has investigated about the application to the accelerator power supply with an energy storage system. Recently, 30GeV rapid cycle operation of J-PARC-MR power supply was studied. In this report, the works of working group will be described and the application for the medical accelerator will be also described

#### 1. はじめに

加速器、特にシンクロトロン電磁石電源においては、パルス励磁による負荷変動が受電ラインに変動を誘起することがある。特に大型加速器においては顕著に表れる。これまで SMES 研究会\*(RASMES: Research Association of SMES)では各種エネルギー貯蔵装置による電力変動を検討してきた<sup>[1]</sup>。

超電導エネルギー貯蔵装置 ( SMES ) の研究は 1970 年代の 12GeV 陽子シンクロトロンが稼働を開始した時期から行われていた<sup>[2,3,4]</sup>。当時、米国においては大型の揚水発電装置に変わりうる装置としての検討が行われていた<sup>[5,6]</sup>。

1985 年に核物理コミュニティから大ハドロン計画が提案され、1997 年には大型ハドロン ( JHF ) 計画として進展した。JHF 計画では 50 GeV シンクロトロンが提案され、当初の設計には主リング電磁石電源の安定化のためにフライホイール (以下 FW ) が導入されていた<sup>[7]</sup>。この仕様は J-PARC 主リングにも踏襲されたが、第一期計画には予算が計上されなかった。2008 年 12 月 23 日に 50 GeV シンクロトロンで周回陽子ビームを 30 GeV のエネルギーまでの加速に成功し、2009 年より供用が始まり、以後紆余曲折あって現在では 30 GeV において本来設計の大強度ビームを供給すべく推移している。

JHF 計画において FW が提案されたことに鑑み、筆者等はすでに述べたように SMES を含む他のエネルギー貯蔵装置の検討を行い、また小規模の装置による実験研究を行ってきた<sup>[8]</sup>。

本稿では、主として J- PARC-MR の 30GeV 速い繰り返しによる変動抑制をケーススタディとして

SMES 研究会を中心に作業部会を組織し検討した内容および粒子線治療加速器についての検討例について論ずる。

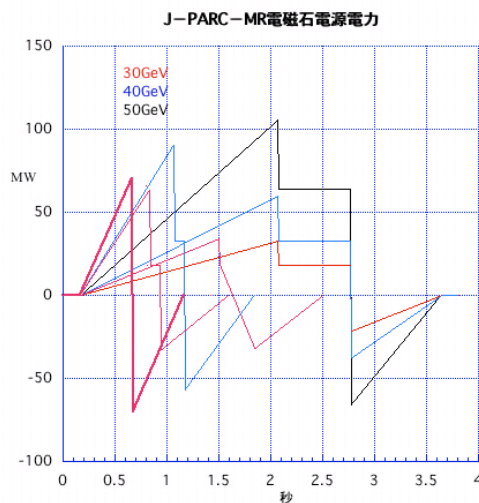


Figure 1: Various operation pattern of J-PARC-MR.

#### 2. J- PARC-MR 電磁石電源電力変動

J-PARC 主リングはビーム強度増強に伴う改良が 2017 年を目処に予定されている。現状の典型的な運転パターンは 30 GeV , 2.5 秒繰り返しであるが、この時の電力変動は peak-to-peak で 66.5 MW になっている。繰り返しを早くすることでビーム強度を増強することが検討されており、現在検討されている増強計画では、エネルギーを 30 GeV に保持し

<sup>#</sup> hikaru.sato@kek.jp, \* <http://www.rasmes.com/>

て、繰り返しを 2.5 秒から 1 秒に早めるといふものである。その時の電力変動幅は約 140 MW になる。従来の運転パターンも含めた電源の運転パターンを Figure 1 に、電力変動を Figure 2 に示す。この電力変動幅を少なくとも現状の 30 GeV、2.5 秒繰り返しの場合以下に抑える必要がある。

変動補償には、キャパシタ、フライホイール (FW)、超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) などいずれかの貯蔵装置を用い、方法としては、交流側で補償する場合と直流側で補償する場合が考えられる。本作業部会では、キャパシタ、FW、SMES、EDLC の貯蔵装置を用いた変動補償についてその得失を比較検討した。

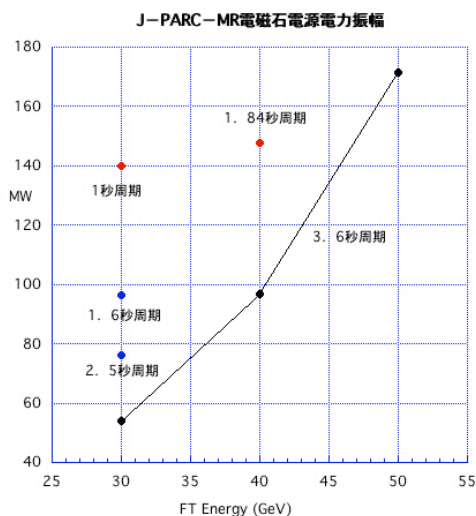


Figure 2: Power amplitude of various operation Pattern.

### 3. それぞれの方式の検討

本稿でそれぞれの方式を詳細に述べることは紙数に無理があり、作業部会の報告書<sup>[9]</sup>を参照していただくことにして簡単な記述に留める。

#### 3.1 キャパシタ方式

キャパシタ方式についてはすでに CERN-PS において稼働実績<sup>[10]</sup>があり J-PARC においても実証試験が行われている<sup>[11]</sup>。近年、フィルムコンデンサの技術は急速に発展し、ここ 15 年でエネルギー密度 (J/kg) は 1.5 倍にもなっている。これは、設置スペースの縮減というメリットおよびコストの大幅な削減をも意味している。コンデンサメーカーによる供給実績も十分あり、懸念される爆発事故報告もない。

回路方式は AC/DC コンバータと出力チョップの直流リンクコンデンサとしてエネルギーストレージ用のコンデンサバンクを設置することで、磁気エネルギーの流れはコンデンサバンクと負荷の間に限定

し、トランスや AC/DC コンバータの容量を小さくできる大きなメリットがある。CERN-PS および J-PARC での実証試験の推移に注目したい。

#### 3.2 FW 方式

フライホイールは昔から繰り返し作られ、特に大型装置としては核融合実験装置など強力な変動磁界が必要な施設において利用されてきた実績がある。最近では実験装置以外にも鉄鋼、鉄道などのパルス電力を使う産業で使われてきている。電力分野では沖縄電力の ROTES (200MJ) が業界ではよく知られおり<sup>[12]</sup>、JHF 計画の検討時に視察にも行っている。また再生可能エネルギーの動揺安定化、停電、電圧低下対策としても注目されている。

50GeV 運転の検討時には同期発電機を想定していたが、この方式は効率は良いが並列運転は回転数が増える時に動揺振動が発生して困難な面がある。今回の作業部会では新しい方式として誘導発電機を並列にして電力のピークを抑えることが提案された。誘導発電機もかご型誘導電動機を導入すると低コストで同期並列運転は自動的になされ、最大の特徴は短時間のピーク出力が定格の 3 倍まで出力できることである。誘導機が必要とする無効電力の供給のため、同期機を 1 台接続しておくシステムの運転開始時、調整運転、さらにシステム電圧安定のためにも役立つ。10 MW の同期発電機に 10 MW のかご型誘導機を必要に応じて数台並列接続することで、運転電力の削減がはかれる。作業部会ではシミュレーション結果が報告された。

また、FW とキャパシタのハイブリッド方式も検討された。

#### 3.3 SMES 方式

SMES は、超電導の電気抵抗ゼロの特徴を利用し、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する装置である。超電導線で作られたコイルに電流を流した場合、電気抵抗がないために、コイルに流れる電流の減衰時定数は無限大となる。この時、コイルの両端を閉じると電流は減衰することなくコイルの中を流れ続け、電流が作る磁場が発生し続けることになる。これにより、磁気エネルギーとして電力が保存された状態となる。SMES では、コイルに電流を流し続けることで、一定の磁界が発生する形として電力が蓄えられている状態となるので、他の貯蔵手法に比べて電力の変換効率がよく、入出力の瞬時応

答性、例えば 1 秒で貯蔵しているエネルギーを放出したり、有効・無効電力の独立制御、さらには数万、数十万回もの繰り返し充放電に対して貯蔵部が劣化しないなどの特徴を持つ。

SMES は、高い電力の貯蔵効率とその優れた耐久性の特長により、研究開発当初の 1970 年代には、昼夜の負荷平準化などの大規模電力貯蔵技術として、検討されてきたが<sup>[15,6]</sup>、最近では秒単位の入出力となる系統安定化用や瞬低補償用の SMES の開発や、

風力や太陽光などの再生可能エネルギーと既存電力系統の調和を図る機器との適用が進展している。Figure 3 に開発の変遷を示す。現在、高温超電導線材による開発も進められている。

瞬低補償用はすでに実用化されており、負荷変動補償についても 20MJ クラスの実証試験が行われた<sup>[13]</sup>。



Figure 3: SMES national project in Japan.

### 3.4 EDLC 方式

電気二重層キャパシタ ( Electric Double Layer Capacitor, EDLC ) とは、活性炭などの多孔質で比表面積の大きな素材を電極として用い、この電極とイオン伝導性の電解液との界面に形成される電気二重層を絶縁層として、通常のコンデンサと同じように電荷を吸着して電気を蓄える蓄電デバイスである。電気二重層を従来のキャパシタにおける誘電体として利用することで、従来のコンデンサに比べ大幅に静電容量の大容量化を実現している。EDLC は性能向上と低価格化が飛躍的に進み、従来の二次電池に比較してエネルギー密度ではまだ及ばないが、高効率、高出力、高繰り返し寿命、残量測定、環境性などの点で優れており、ハイブリッド自動車や電気自動車への搭載をはじめ、瞬時電圧低下補償装置にも適用範囲が広がってきている。また、SMES と比較した場合、冷却が不要でメンテナンスフリーであり取り扱いも容易である

EDLC による電力補償は SMES 同様、J-PARC 電源の交流側と直流側のどちらでも可能であるが、作業部会では交流側に比べ電力変換器の数が少なくなる利点がある直流側電力補償について検討した。回路方式とシミュレーション結果については、これも作業部会報告書を参照していただきたい。

### 4. 比較検討

キャパシタ、フライホイール ( FW ) , SMES , 電気二重層キャパシタ ( EDLC ) の貯蔵装置を用いた J-PARC-MR の 30 GeV 速い繰り返し運転にかかわる電源電力補償装置の特徴、得失の比較を表にまとめた。本稿に載せるべきであるが、紙数の関係

で割愛したので報告集<sup>[9]</sup>を参照していただきたい。EDLC は一種のキャパシタであるが、比較表には別途記載されている。超電導 FW は開発中であり実用の点で実績はないがこれも比較表に記述した。同様に、高温超電導を用いる SMES に関して国プロ等で開発が進められているが、今後の参考に本文と比較表に記載している。耐久性では、耐用年数が来て交換の必要が生じた時の廃棄による環境への影響についても念頭におく必要がある。コストについては、貯蔵装置の出力 ( kW ) と貯蔵容量 ( kWh ) 当たりでの算出があるが、ここでは出力 ( kW ) 当たりの単価として算定した。直流側 ( 負荷 ) リップルについては、負荷電磁石電源の制御方式によるところが大きく、今回は比較検討外とした。

Figure 4 に国内において稼働中のエネルギー貯蔵施設を示す。

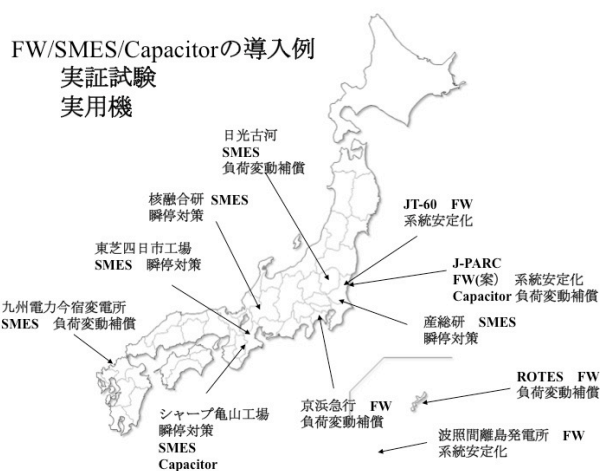


Figure 4: Map of the energy storage system in Japan.

## 5. 医療用加速器における応用

本章は 2008 年度に SMES 研究会において検討した内容をベースにしたものである。医療用などの小型シンクロトロンについては、陽子線、重粒子線合わせて 11 カ所が稼働中<sup>[14]</sup>であり、建設予定も含めるとすでに国内において 20 ヶ所以上になろうとしている<sup>[15]</sup>。

パルス運転に伴う入出力エネルギー量は比較的少ないが、大型加速器のように特別高圧受電線を引かずに、一般商用線から受電することが多く、やはり負荷変動補償は必要である。また負荷平準化をすれば運転コストの低減も期待できる。施設によって多少の違いはあるが、概ね 3 秒周期の繰り返しが多い。準備調整時間を含めて 1 日 10 時間の運転を年間 300 日行い、加速器の寿命を 30 年とすると、総繰り返し回数は、 $1.1 \times 10^8$  回となる。

施設の例として兵庫県立粒子線医療センターと群馬大学重粒子線医学研究センターの 2 箇所の施設の運転状況からエネルギー貯蔵施設の導入効果を試算した<sup>[16]</sup>。しかし、これらの施設も含め既設の施設でも省エネルギー化の改良などが行われ、新たに建

設される施設でも検討されているので、現時点での見直しをする必要がある。それらを斟酌したとしても粒子線治療装置として加速器やガントリーの小型化と合わせて、省エネルギー化、負荷平準化のためにもエネルギー貯蔵装置も含めた施設の標準化をはかるべきであると提案したい。

## 5. まとめ

J-PARC-MR 電磁石電源の 30GeV 速い繰り返し運転にともなう電力補償装置の特徴、得失について検討を行った。この目的に適していると考えられるキャパシタ、FW、SMES、EDLC について検討した。今回比較対象とした電力補償装置の技術開発レベルは同一ではない。特に、液体窒素温度での運転が可能になるため、将来的には技術的優位性が高まるものと想定されている高温超電導線材を用いた SMES に関しては、技術的完成の前提となる高温超電導線材が依然として開発中である。

これらの装置を設置することで電力系統への変動を補償できるだけでなく、回生エネルギーを有効に利用でき、電力系統からは主リング電磁石の抵抗によるロス分だけの補給でよいので、省エネルギーにもなる。今回の検討の中ではこれらの方式による技術的成立性の隘路となるような差は見えてこなかった。これは、両者をつないでエネルギーの流れを制御するパワーエレクトロニクス技術が進展し、それぞれに応じた素子あるいは回路構成技術が発展してきているためと考えられる。

これらの技術は粒子線治療施設についても適用可能であり、今後も稼働施設が増えることを考えるとエネルギー貯蔵施設を付加した施設として標準化をはかることが、国内のエネルギー需要への貢献度が大きいと考えられる。

## 参考文献

- [1] RASMES 研究会平成 16 年度研究報告書, 平成 18 年度研究報告書, 平成 19 年度研究報告書 (require a password)
- [2] M. Masuda, T. Shintomi, S. Matsumoto, H. Sato, and A. Kabe, "100 kJ Superconducting Coil Energy Storage," Proc. of the 6th Int. Conf. of Mag. Tech. (1977) 254-259.
- [3] M. Masuda, T. Shintomi, H. Sato, and A. Kabe, "Superconducting Energy Storage Magnets," IEEE Trans. Magnetism, MAG-15 (1979) 318.
- [4] T. Shintomi, M. Masuda, H. Sato, and K. Asaji, "3-MJ Magnet for Superconductive Energy Storage," Advances in Cryogenic Engineering, 25 (1980) 98-104.
- [5] W.V. Hassenzuhl, "Will Superconducting Magnetic Energy Storage be Used on Electric Utility System," IEEE Trans. Magnetism, MAG-11, 1975.
- [6] R.W. Boom et al, Wisconsin Superconducting Energy Storage Project, vol. 1, Engineering Experiment Station, Univ. of Wisconsin, July 1, 1975.
- [7] 武藤正文他, 「JHF50GeV Main Ring 電磁石電源について」, KEK Report 98-14, JHF 98-5, February 1999 A.
- [8] 佐藤他, 平成 11 年度-平成 12 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書「大電力かつ速い変動負荷に於ける電源系統の安定化」(課題番号: 11650308) .

- [9] <http://accl.kek.jp/seminar/default.html#20140501>
- [10] F. Bordry et al., "A novel 60 MW Pulsed Power System Based on Capacitive Energy Storage for Particle Accelerators," EPE Journal, vol. 18, no. 4, December 2008.
- [11] 森田他、本学会発表 SUPO64.
- [12] T. Nohara et al, "Successful commercial operation of doubly-fed adjustable speed flywheel generating system," Proc. CIGRE/IEE Jpn. Joint Colloq. Rotating Elect. Mach. Life Extension, Availability Improvement, Dev. New Mach., (2-2), 1997, pp. 1-6.
- [13] T. Katagiri et al, "Field Test Result of 10MVA/20MJ SMES for Load Fluctuation Compensation," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1993-1998, 2009.
- [14] 安井一徳、国立国会図書館調査及び立法考査局 社会労働課現地調査報告書、<http://altmetrics.ceek.jp/article/dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8392376>
- [15] 医用原子力便り第 12 号、平成 23 年 12 月発行
- [16] Hikaru Sato et al., "Application of Energy Storage System for Stabilization of Accelerator Magnet Power Supply," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.20, #3. 2010, pp.1312-131.