

加速器電源における省エネと安定化対策

SAVING ENERGY AND STABILIZATION FOR ACCELERATOR POWER SUPPLY

佐藤 皓

Hikaru Sato

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Large Scale Research Facility such as J-PARC is faced on a budgetary deficit and also environmental concerns. Then, affordable and sustainable energy supply should be considered to continue and develop the big science. Magnets of the synchrotron are excited by a pulse operation power supply, and then the load fluctuation should be a severe problem. An energy storage system, such as superconducting magnetic energy storage (SMES), fly-wheel generator so far are expected to protect the load fluctuation and the instantaneous voltage drop. The author has investigated about the application to the accelerator power supply of SMES. In this report, he will describe the present status and future of the energy storage systems for large scale research facilities especially an accelerator facility. Feasibility of the sustainable energy supply will be discussed.

1. はじめに

ラザフォードがラジウムからのアルファ線を使って原子核実験をしていた時代(1919年)、「ラザフォードの技巧の退屈さが多い有能な核物理学者を遠ざけていた。もし、原子核粒子が100万ボルト近くのエネルギーに加速されたとすれば、電氣的に加速された軽い原子核の100マイクロアンペアの方が、世界中で供給されるラジウムよりも価値があることが簡単な計算で分かっていた」と言われていた^[1]。1930年代に入って、線形加速器やサイクロトロン、コッククロフト等が発明され、最初にコッククロフトにより加速された700KeVの陽子線をリチウム標的にあてる実験が行われた。線形加速器、サイクロトロン、シンクロトロン等々、粒子線加速器は物理学的必要と共に発展進化してきた。それから80年を経過した現代、今や衝突型加速器等より高エネルギーへと、また精密実験や物質構造解析のためのより大強度のビームが求められ、あるいは放射光も含め、用途も医学利用、民生利用に広がってきている。

大型加速器は膨大な電力を消費し、電力料金も巨額となる。特にJ-PARCなど巨大科学実験においては顕著であり、実験遂行にも影響を与えかねない。基礎科学から許されようという考えは、3.11震災を経験して以後は受け入れがたいものになっている。筆者は以前からエネルギー貯蔵装置による電磁石電源の安定化、再生可能エネルギー、Co-Generationシステム等の導入を提案していた^[2]。省エネルギーの観点も取り入れたシステムのあり方について述べ、加速器のような大型実験施設において、電力使用や計画にどのような工夫と配慮が必要か議論を提起した。加速器電源シンポジウムでも数回にわたり議論された^[3]。本稿はその後の再生可能エネルギー利用やエネルギー貯蔵装置の進展を概観しつつ、J-

PARC-MR電磁石電源や粒子線治療加速器を例にとり、またILCまで展望した議論を提起する。

2. 加速器電源と電源変動補償装置

J-PARCやCERN-PS-ComplexやBNL-AGS-RHICなどでは、電力料金が実験計画に大きな影響を及ぼすようになってきている。また、シンクロトロンは加減速を繰り返すことにより、大きな電力の充放電を行い、受電ラインに電力変動をもたらす。それが系統の需要家に影響を与えないような注意が必要となってきている。とりわけ2011年3月11日の東北大震災とそれにともなう福島第一原子力発電所の事故以来、電力供給が逼迫し、再生可能エネルギーへの注目度もあがり、系統の安定化も重要な課題となってきている。

大型加速器の電源は受電ラインへの影響を考慮して特別に高圧の受電をするようになってきている。それでも、電源変動を抑制するための対策装置が必要とされることが多い。1996年にシャットダウンされた12GeV-PSの主リング電磁石の電源の場合は、66kVで受電し、6.6kVに降圧している。23.6MVAのサイリスタ変換機、20MVar遅相の無効電力補償装置と20MVar進相の高調波フィルターから構成されていた^[4]。無効電力補償装置はサイリスタ制御によるリアクトル電流制御方式の静止型補償装置(SVC)であった。制御装置を改造して^[5]、相間の電圧バランスの調整もできるようになり、リップル低減に効果を挙げた^[6]。CERN-PSやBNL-AGSではMG(モータージェネレーター)を用いている。Table 1に主な大型加速器の電磁石電源の方式を示す。

12GeV-PS級の加速器ではSVCで電圧変動を抑制することができるが、J-PARC級になると無効電力補償だけでは抑えきれず、実効電力の補償も必要となる。すなわち、電源変動を ΔV 、実効電力変動を ΔP 、無効電力変動を ΔQ 、系統インピーダンスの抵抗分を R 、リアクタンスを X とすると、 $\Delta V = \Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X$ であり、通常の電

気機器であれば $R \ll X$ なので、 ΔQ の変動を抑えれば電圧変動が抑制できる。しかし、Figure 1に示すように、J-PARC-MRの電源では実効電力の変動幅が100~170MVAと大きく、右辺第一項も無視できない。

Table 1: Electrical Power Equipment for Typical Large Synchrotrons

	J-PARC	CERN-PS	BNL-AGS
Repetition (s)	3.64	2.5	1.4-3.0
P_{total} (MW)	105	40	5/70
V_{prim} (kV)	66/22/6.6	130/18	138/69/13.6
Compensator	51 MVA-FW 90 MVA-SMES	7 MW-motor/90 MVA-FW (233 MJ) => 18.5MJ capacitors	9 MJ MG (34 MJ MG) => 12.6 MJ capacitor proposed
Comments	Phase II	Injector for LHC	Injector for RHIC

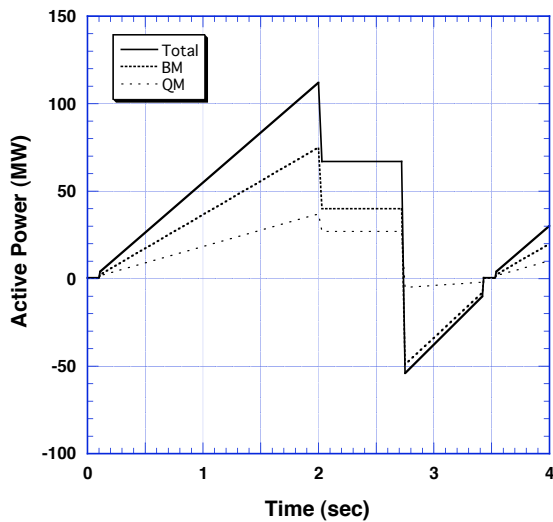


Figure 1: Pattern of the active power of the MR at the 50 GeV operation. The solid line is for the total required active power, and the dotted lines are for the dipole magnet (BM) and quadrupole magnet (QM), respectively.

実効電力を補償するためにはなんらかのエネルギー貯蔵装置が有効である。エネルギー貯蔵装置としては種々考えられるが、シンクロトロンのような速い繰り返しの装置の場合、フライホイール (FW)、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) やキャパシタが考えられ、各所の加速器施設で比較検討がされている。CERNでは24GeV-PSの電源に建設当初からモーター発電機 (MG) が使われていたが、老朽化のために時期装置としてこれらの3種のエネルギー貯蔵装置を比較検討し^[7,8]、結果としてキャパシタ方式による貯蔵装置を導入した^[9]。BNL-AGSも同様にMGを建設当初から使っており、やはり老朽化により時期方式を検討している^[10]。J-PARC-MRではJHF計画当時FW方式が設計仕様になっていたが^[11]、50GeV計画が次期計画になったのを機にSMESの検討をSMES研究会^[12]の協力を得て数年にわたり行った^[13]。現在は30GeVで速い繰り返しによる大強度化が具体的に論じられる中で、30GeVであってもエネルギー貯蔵装置が必要となってきた。現在、J-PARC-MR電源グループによりキャパシタ方式の実証試験が行われている^[14]。

3. エネルギー貯蔵装置R&Dの経緯と状況

JHF計画でFWが提案されたのを機に科研費やKEK内の重点配分経費等でFW^[15]、SMES^[16]の検討が行われた。この時点ではキャパシタは寿命の点で難ありと判断された。

米国では1960年代の末から研究が進められてきた^[17,18]。日本においては、1970年代にKEK-PSにおいて主リング電源の充放電エネルギーの平滑化のための開発研究が行われ^[19,20]、KEKにおいて2回のワークショップが開催された^[21,22]。また、核融合炉用電源においてもSMESが注目され設計研究が行われた^[23]。Table 2にKEKにおけるエネルギー貯蔵装置の研究経過を示す。

Table 2: History of the Studies for the Energy Storage System at the KEK

1970's	<ul style="list-style-type: none"> • 100KJ SMES Experiment. • 3MJ SMES Coil Design. • Collaboration with Wisconsin University.
1997-2002 KEK Director Support Japan Society for the Promotion of Science	<ul style="list-style-type: none"> • Visit to ROTES at Okinawa. • 75KW-FW experiment. • Collaboration with Okayama University.
2003-2006 Collaboration with Univ. & RASMES	<ul style="list-style-type: none"> • Studies of SMES for J-PARC 50GeV-PS. • Studies of SMES for Medical Accelerator. • 10KJ-SMES simulation Experiment.
At this Present	<ul style="list-style-type: none"> • POP Experiment of Capacitor System. • Studies of SMES for 30GeV Rapid Cycle Operation of J-PARC PS.

1970年代以降のSMESの研究は産業応用の方面では国家プロジェクトを中心としてR&Dが続いていた。すなわち、NEDO^[24]主導の国家プロジェクトが3次にわたって行われ、MJ規模の実績がある。これにより、20MJ-SMESによる負荷変動補償の実証試験が中部電力により古河日光発電所の水力発電施設において行われ、金属ローリング装置の稼動による負荷変動を成功裏に補償してみた^[25]。数MJ~20MJの瞬時停電補償はすでに核融合研や産総研等の実験施設やシャープ亀山工場や東芝四日市工場などで稼動している^[26,27]。ちなみに、シャープ亀山工場ではキャパシタによる瞬時停電補償装置も併用されていることを付けくわえておく。FWはすでに沖縄電力において200MJ装置での負荷変動補償の実機が稼動しており^[28]、企業の実績は問題ないとしてJHF計画の設計仕様に取り入れられた。Figure 2に日本各地における数MJ級以上のエネルギー貯蔵装置を示し、各装置の比較と実例をTable 3に示す。

TABLE 3
POWER COMPENSTORS AND THEIR APPLICATIONS

Apparatus Characteristics		Results	
		Facility	Capacity
FWG	Fast response	Keihin El. Express Railway	25 kWh
	<i>Repetitive stress</i>	Okinawa Electric Power	200 MJ
	<i>Maintenance</i>	Fusion: JT-60 (Accelerator: J-PARC)	1300 MJ
SMES	Fast response	Accelerator: BNL NSLS	2.4 MJ
	High efficiency	UPS: Sharp Kameyama Plant	10 MJ
	<i>AC loss</i>	El. Power: National project	20 MJ
		Kyushu Electric Power (Accelerator: J-PARC)	3.6 MJ
Capacitor (EDLC)	Fast response	UPS: Sharp Kameyama Plant	200kVA
	Small & med. size	(Accelerators: BNL-AGS, CERN-PS)	50 – 500 kW
	<i>Repetitive life</i>	HEV truck	~100,000
Battery	Small & med. size	HEV truck	50 – 500 kW
	<i>Repetitive Life Maintenance</i>		~1,000

The parentheses indicate under investigation.
The italic words mean shortcomings.

Experience of Energy Storage System in Japan
- Field Test/R&D & Industrial Product -

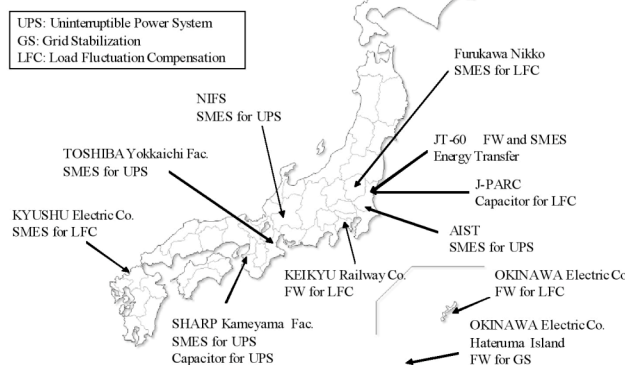


Figure.2: Energy storage systems in Japan.

4. 大型加速器におけるパルス電力補償

パルス運転される大型加速としてJ-PARCを例として検討された。50GeV運転の場合には、有効電力は平均で19.1 MW、ピーク電力は72.5 MWと—54.4 MWをスイングする。このように大きな変動電力が電力系統との間でやり取りされるため、許容値以上の擾乱が発生する。40GeV-3. 6秒周期であれば負荷変動補償の必要はないとされており、変動電力補償装置の設計にあたっては50 GeV運転時の変動電力を40 GeV運転時の電力変動分100MW以下に抑えるように考えればよいとした。従って、60 MWを越える変動部分を補償するとして、その部分のエネルギー量は約30 MJとなる。補償装置としてSMESを考える時、交流損失を考慮してSMES容量の30%を補償用に使うものとして、100 MJの容量を持つコイルを考えればよいことになる。

FWの場合についても、容量的にはほぼ同様である。FWの場合は交流系統に接続して補償する方式となるが、SMESの場合にもFWと同様に交流系統に接続する方式

もあるが、直流系統に接続する方式も採用でき、この方が受電電力を平均電力に取れ、電力変換システムの容量を小さくできる点でメリットがある。キャパシタ方式の場合も同様なシステムとなる。

5. 小型加速器への応用

医療用などの小型シンクロトロンについては、建設予定も含めすでに国内において20ヶ所以上になろうとしている。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、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、概ねピーク電力を2500kWとし、それを回生エネルギーとして蓄積した場合電力変換器の効率を90%として、338kJが次の励磁時に有効利用できる。これは1日8時間、年間250日の運転として、676MWhの電力の節約になる^[29]。

5. 再生可能エネルギーの応用

電力供給源としてメガソーラーなどの再生可能エネルギーを取り込むことも検討すべきである。数MW級は多数が10MW級の発電所も相当数稼働している^[24]。大型加速器電源に直接投入するにはパワー不足であることは否めないが、付帯する冷却装置等には十分であり、導入することにより施設全体としての省エネルギー運転および運転経費の削減のためには十分有効と考えられる。KEKにおいては3MWの発電を行っているクリーンセンターが隣接しており^[30]、こうした施設との連携も進めるべきであろう。医療用加速器施設ではCo-Generationシステムを併用すれば再生可能エネルギーで十分であり、供給の不安定性をエネルギー貯蔵装置でまかなえば安定な電力供給が可能と考えられる。Co-Generationシステムはすでに理研RIBFにおいて導入されている^[31]。

CERNが関与する再生可能エネルギー利用に関するWSが2011年に行われ^[32]、2回目が2013年10月に予定されている^[33]。

6. まとめ

エネルギー貯蔵装置としてFWは比較的早くから実用化されてきた。それに匹敵する容量のSMESの開発研究は主に国家プロジェクトとしてNEDOを中心に行われてきた。JHF計画時点では200MJのFWの実績はあったが、数MJ級のSMESの実績がないことが指摘されていたが、現在は20MJ級の実績がある。キャパシタも当時は繰り返し寿命の点で難ありと判断されていたが、現在ではキャパシタの技術革新を進んでいる。施設の実情に応じた様々なエネルギー貯蔵装置を加速器に搭載し、電源の安定化、省エネルギー化を導入することが求められる。

再生可能エネルギーも容量は小さいものの付帯設備電源に導入することにより、施設全体としての運転経費削減に寄与するであろう。医療用加速器や小型放射光加速器にはすでに十分な容量があると考えられる。日本では各種のエネルギー貯蔵装置の産業応用の実績があり、再生可能エネルギー施設について

も十分な社会的基盤がある。多大な電力を使用する加速器業界がこれらを積極的に導入していくことが求められる。こうした考え方はILCにも導入すべきであり、大いに議論が進むことを期待したい。

参考文献

- [1] 『原子爆弾の誕生』(The Making of the Atomic Bomb) リチャード・ローズ (Richard Rhodes)紀伊国屋
- [2] ASN-399, 1998, <http://www-accps.kek.jp/AlIOK/kek-staff/index/ASN301-400.html>
- [3] Proceedings of the 5th, 6th, and 7th Symposium on Power Supply Technology for Accelerator, 1999, KEK, 2000, Spring-8 and 2002, Shirahama respectively.
- [4] H. Sato, T. Sueno, T. Toyama, M. Mikawa, M. Toda, S. Matsumoto and M. Nakano Performance of the Main Ring Magnet Power Supply for the KEK 12 GeV Proton Synchrotron IEEE Transaction on Nuclear Physics, NS39 (1992) 1490-1495.
- [5] S. Matsumoto, H. Baba, H. Sato, T. Sueno and K. Mikawa , Improved Control System of Thyrister Flicker Suppressor for the KEK 12GeV PS, IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS30 (1983) 2932-2935.
- [6] H. Sato, T. Sueno, M. Mikawa and T. Toyama , Reduction of the Uncharacteristic Ripple Component in the Synchrotron Power Supply, Conference Records of the IEEE Nuclear Science Symposium, Orlando, Florida, Oct. 1992, 569-571
- [7] 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.
- [8] R. Gehring, et al., A SMES-Based Power Supply for Accelerator Magnets, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 16, NO. 2, JUNE 2006
- [9] Jean-Paul Burnet, A novel 60 MW Pulsed Power System based on Capacitive Energy Storage, <http://europeanspallationsource.se/energyworkshop>
- [10] I. Marnieris, et al., SIMULATIONS OF THE AGS MMPS STORING ENERGY IN CAPACITOR BANKS, Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, pp.652-654
- [11] 武藤正文他、JHF50GeV Main Ring 電磁石電源 KEK Report 98-14, JHF 98-5, February 1999 A
- [12] www.rasmes.com/
- [13] SMES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
- [14] J-PARC-MR主電磁石電源レビュー委員会 (2012/10/2)
- [15] H. Akagi and H. Sato, Control and Performance of a Flywheel Energy Storage System Based on a Doubly-Fed Induction Generator-Motor for Power Conditioning, Proc. of the 99' Power Electronics Specialisits Conference, Charleston, June 27-July 2, 1999, 32-39.
- [16] T. Ise et al., "Magnet Power Supply With Power Fluctuation Compensating Function Using SMES for High Intensity Synchrotron", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, June 2003, pp. 1814-1817
- [17] W.V.Hassenzahl, Will Superconducting Magnetic Energy Storage be used on Electric Utility System, IEEE Trans. On Magnetism, MAG-11, 1975
- [18] R.W. Boom et al, Wisconsin Superconducting Energy Storage Project, Vol.1, Engineering Experiment Station, Univ. of Wisconsin, July 1, 197
- [19] 100 KJ Superconducting Coil Energy Storage, M. Masuda, T. Shintomi, S. Matsumoto, H. Sato and A. Kabe , Proc. of the 6th Int. Conf. of Mag. Tech (1977) 254-259
- [20] T. Shintomi, M. Masuda, H. Sato and K. Asaji , 3-MJ Magnet for Superconductive Energy Storage, Advances in cryogenic Engineering, 25 (1980) 98-104.
- [21] M.Masuda et al., Proceedings of the 1st Meeting of Superconductive Coil Energy Storage, Tsukuba, January 29, 1977 (in Japanese), KEK-77-6 June 1977
- [22] M.Masuda et al., Proceedings of the 2nd Meeting of Superconductive Coil Energy Storage, Tsukuba, 1978 (partially in English), KEK-78-26 February, 1979 A
- [23] 核融合研究部炉設計研究室、トカマク型核融合炉用超電導誘導エネルギー蓄積装置の設計研究、JAERI-M 7201,1977
- [24] <http://www.nedo.go.jp/>
- [25] T.Katagiri et al, Field Test Result of 10MVA/20MJ SMES for Load Fluctuation Compensation, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol.19,No.3,pp1993-1998, 2009
- [26] 産総研、RASMES 2011.10 Vol. 37
- [27] http://www.chuden.co.jp/corpo/publicity/-press2003/0221_1.html
- [28] 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
- [29] 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.1312-1315
- [30] <http://www.city.tsukuba.ibaraki.jp/mobile/life/-facility/etc/1.htm>
- [31] Takashi Emoto et al., "Co-Generation System for RIBF", Proceedings of the 17th International Conference on cyclotrons and their applications, pp. 163-165, October 2004, Tokyo, JAPAN.
- [32] <http://europeanspallationsource.se/energyworkshop>
- [33] http://cern.ch/energy_sustainable-science2013