

# J-PARC 主リング電源電力変動補償の検討

## 1 はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、素粒子・原子核物理、物質・生命科学、原子力など幅広い分野の最先端研究を行うための陽子加速器群と実験施設群で構成される。J-PARC の最大の特徴は、世界最高クラスの陽子 (1 MW) ビームで生成する中性子、ミュオン、K中間子、ニュートリノなどの2次粒子ビーム利用にある。KEKとJAEAが共同で提案し、2008年にJAEA 東海の原子力科学研究所内に第一期施設が完成した。J-PARCでは、初段が400 MeV のリニアック、3 GeVまで加速するRCS (Rapid Cycling Synchrotron) , さらに一部を50 GeV (現在は30 GeV) まで加速するMR (Main Ring) の陽子加速器構成で世界最高クラスの大強度陽子ビーム生成を目指している。現在パワー増強計画の見直しにより、RCSで2015年度内に1 MWに到達することを目標とし、MRでも30 GeVにおいて加速繰り返し周期を早くすることで設計ビームパワーを得ることが検討されている。

J-PARCは1974年に東京大学原子核研究所 (当時) の将来計画であるニューマトロン計画にその端を発すると言ってよい。その発展形として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、それはさらに1987年に大型ハドロン計画 #1として提案され、1997年には大型ハドロン計画 #2として進展した。これらはJHF計画と呼ばれている。そしてJHFをつくばサイトに建設をすとして、この年に東大原子核研究所、高エネルギー物理学研究所と東大中間子科学センターが統合して現在の「高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 」となった。日本原子力研究所 (当時) の中性子科学研究計画とJHF計画を統合して進める合意が1998年にされ、その後、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で運営する大強度陽子加速器施設 (J-PARC) として建設されることになった。

JHFプロジェクトにて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。これはJ-PARC 主リングにも踏襲されたが、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のエネルギーまで加速させダンプへ取り出すことに成功し、2009年より供用が始まった。以後、紆余曲折あって現在では30 GeVに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FWが導入される設計がメーカーから提案されてはいたが、KEKにおいてその基礎研究をする必要があるとの認識に立ち、機構長留保経費や科研費により当時

稼働していたFW (ROTES) の視察や小規模のFWによる電磁石電源安定化の実験を行った。同時に二期計画が具体化するまでの時間を使って超電導エネルギー貯蔵装置 (以後SMES) の導入効果を検討してきた。

FWはすでに産業応用として稼働している機器が大小ある。特に沖縄電力の200 MJのROTESは本業界では有名である。他に鉄道業界に負荷変動補償として、また小規模のFWが瞬低補償に使われている。

SMESはNEDOの下に数次にわたってプロジェクト研究が行われた。第一期 (1991-1998) では要素技術開発, 第二期 (1999-2003) ではSMESシステムの低コスト化, 第三期 (2004-2007) では実系統連系試験による負荷変動補償の実証試験, 第四期 (2008-2012) では高温超電導ケーブル実証プロジェクトが行われた。瞬低補償としてはすでにシャープ亀山工場, 東芝四日市工場や産業技術総合研究所筑波つくばセンター西地区で実用機が稼働している。負荷変動補償については, 第三期NEDOプロジェクトにおいて古河電工日光事業所で中部電力が行った20 MJの実証試験が報告されている。SMESに関する検討については超電導エネルギー貯蔵研究会 (以後SMES研究会) の貢献が大であり, 16, 18, 19 年度に渡り3回の研究報告書が出されている。

日本において超電導エネルギー貯蔵の研究は, 12 GeV-PS建設当時の主リング電源グループの責任者であった故増田正美教授 (当時) により始められた。同時期に, 日本原子力研究所 (当時) においてもトカマク型核融合炉への応用が検討されていた。先んじて, 米国のLos Alamos研究所のW.V. Hassenzahlはピーク電力調整用として90 kJコイルでの実験を行っていた。米国Wisconsin大学のR.W. Boom教授 (当時) 等は当初より揚水発電に変わりうる大型施設を提案, 強固な岩盤地盤に設置し電磁力に対応しようとしていた。一方, 増田氏は12 GeV-PSのような繰り返し充放電する負荷を持つ電源に備えて負荷平準化を計ることを目標とし, 基礎研究として, 100 kJ, 3 MJのSMESコイルによる実験が行われた。

2004 年に九州電力との共同研究でESK (Experimental SMES of Kyushu Electric Power) を移設して12 GeV-PSのビーム取出用セプタム電磁石電源の負荷変動補償が計画されたが, 研究資金の目処が立たず断念された。

JHF 計画では東京電力との協議によりピーク電力変動が100 MW以下であれば受電ラインの変動は許容できるとの合意に基づき, FW容量が150 MVAと求められた。一方, シンクロトロンのような速い繰り返し充放電にたいしてFWに関する基礎的実証実験を行うために, 科学研究費, KEK機構長留保経費等により, 岡山大学パワーエレクトロニクス研究室との共同研究を行った。また各地の電源施設の視察を行った。

J-PARCでは当初の大強度ビームの実現を30 GeVの速い繰り返しで行うこととする検討が具体化してきた。この場合, 繰り返しが速いことにより電源変動が無視できなくなり, エネルギー貯蔵装置が必要とされることとなった。現在, キャパシタを用い

た実証試験が行われている。ただ、実際にJ-PARC主リング電磁石電源に搭載するにあたり、FWやSMESとの比較検討も必要とされ、SMES研究会において作業部会を構成し、検討をすることとなった。開催された作業部会を巻末資料1に示す。

2012年11月9日のJ-PARC担当者打ち合わせにおいて佐藤が、2013年5月1日のKEK電源担当者およびシステム担当者との打ち合わせにおいて新富がSMES研究会の研究経過を報告した。

諸外国でもBNLやCERNなどでは、建設当初の陽子シンクロトロンが現在でも稼働しているが、電磁石電源の安定化に使用されてきたMG装置の老朽化が問題となり、エネルギー貯蔵装置の検討が行われてきている。CERNではSMES, FW, capacitor等の比較検討が行われ、現在キャパシタ搭載装置が導入された。

以上がJ-PARC関連のエネルギー貯蔵装置に関する検討経過である。

なお、SMES研究会では粒子線治療装置についてもエネルギー貯蔵装置の検討を行ってきたが、現在キャパシタによる電磁石との間のエネルギー転送を行う形式の電源を搭載した粒子線治療装置が稼働している。

最後に現在の日本に於けるエネルギー貯蔵装置を図1.1に示す。

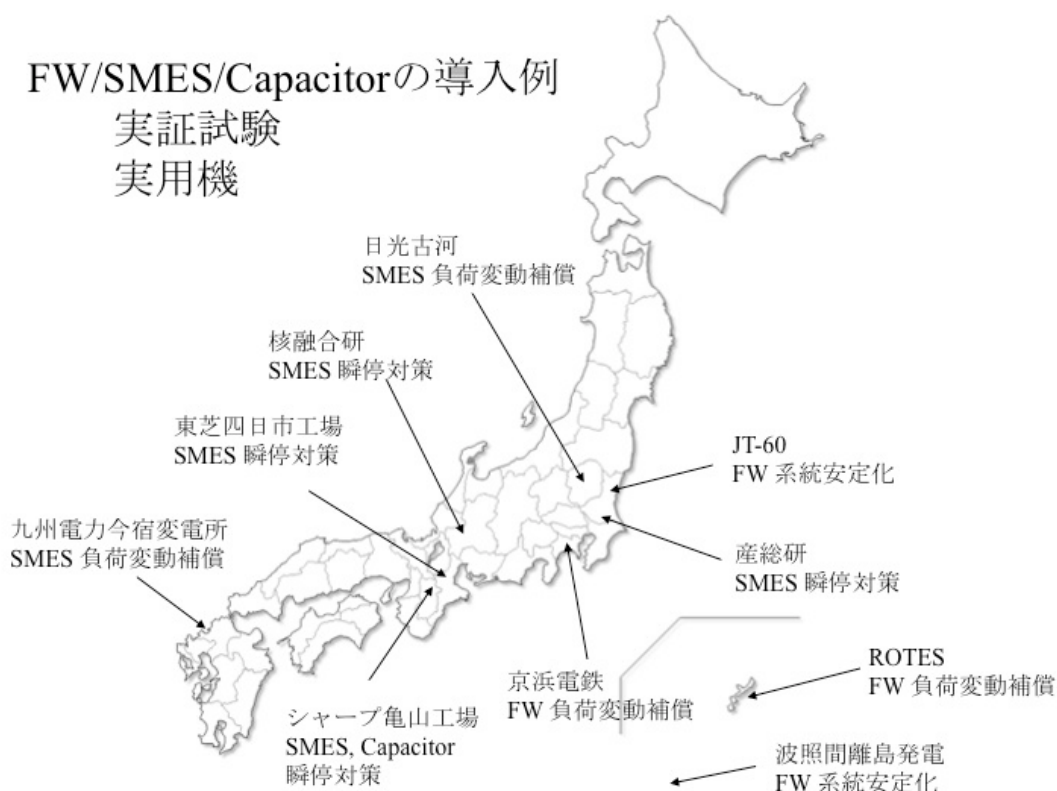


図1.1 FW/SMES/Capacitorの導入例

参考資料については、本文中に番号を付けて引用することをせず、分野別にまとめて最後に掲載することとした。

## 2. J-PARC 主リング電源電力変動

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、この時の電力変動の実測値は図 2.1 に示すように peak-to-peak で 66.5 MW になっている。

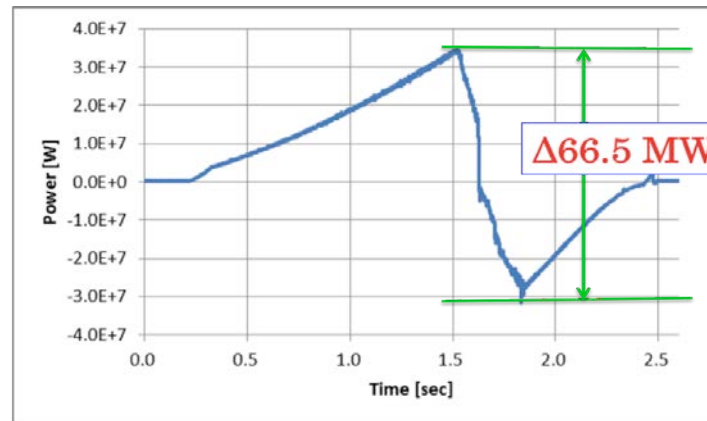


図 2.1 2.5 秒繰り返しの時の電力変動幅

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いる。運転パターンによる電力変動幅を図 2.2 に示す。現在検討されている増強計画では、エネルギーを 30 GeV に保持して、繰り返しを 2.5 秒から 1 秒に早めるというものである。その時の電力変動幅は約 140 MW になる。

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。

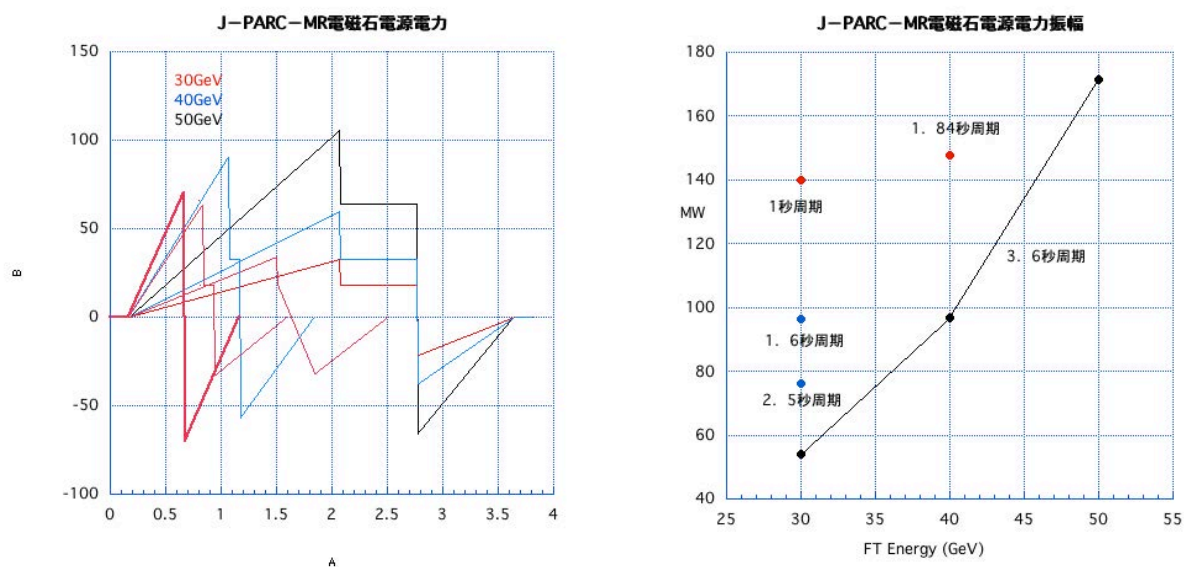


図 2.2 運転パターンによる電力変動幅

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て行う。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が、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する。

### 3. 主リング電磁石電源構成

主リング(MR)の電磁石電源は主に、偏向電磁石用の6台、四極電磁石用の11台、六極電磁石用の3台からなっている。それぞれの電源はD1, D2, D3の三カ所の電源棟に分けて設置され、各電源棟ヤードにて交流22kVを受電している。直線部の四極電磁石用電源と六極電磁石用電源はD1電源棟に設置されており、D1電源棟ヤードの降圧トランスによって22kVから6.6kVに降圧した交流を受電している。この22kV系統は50GeV特高受電所に設置された50MVAの66/22kVトランスから各電源棟に分配されている。このトランスはMR主電磁石電源に対してのみ、電力を供給している。

図3.1に交流系統の概略図を示す。J-PARCが設置されているのは日本原子力研究開発機構東海研究開発センター(原研東海)の敷地内であるため、東京電力からの受電は原研東海と共通で、154kVを受電している。原研東海内の受電所(特高受電所)には二基のトランスがあり、一つは原研東海の北側にある各実験施設等へ、もう一つはJ-PARCが主に設置されている南側へ電力を供給している。このとき、J-PARCのLINACやRCS、中央制御棟(CCR)は北側に接続され、残りのMR、NU、HD、MLFは南側に接続されている。北側と南側とは図3.1中の[\*]において接続可能である。実際、トランス点検時やJ-PARCのシャットダウン時には接続しており、トランス一基で受電した運転を行っている。MRの主電磁石電源運転時に発生するフリッカーによる交流電圧変動の影響は、[\*]で切り離されていることによって、南側地区だけで照明の揺らぎなどとして観測される。[\*]を接続している状況において、MR主電磁石電源のパターン運転を行った際には、北側地区の施設に設置されたモータ類が、パターン周期に同期してうなり音を上げたことがわかっている。

主電磁石電源の消費電力は運転パターンによって異なるが、NUへのビーム供給運転である2.5秒繰り返しの場合、平均10MWであり、HDへのビーム供給運転であるビーム取り出し時間が延びた6秒繰り返しの場合、平均14MWである。このとき、電力計ではマイナス電力も計測されており、NU運転の時は-3MW、HD運転の時は-1MWとなっている。

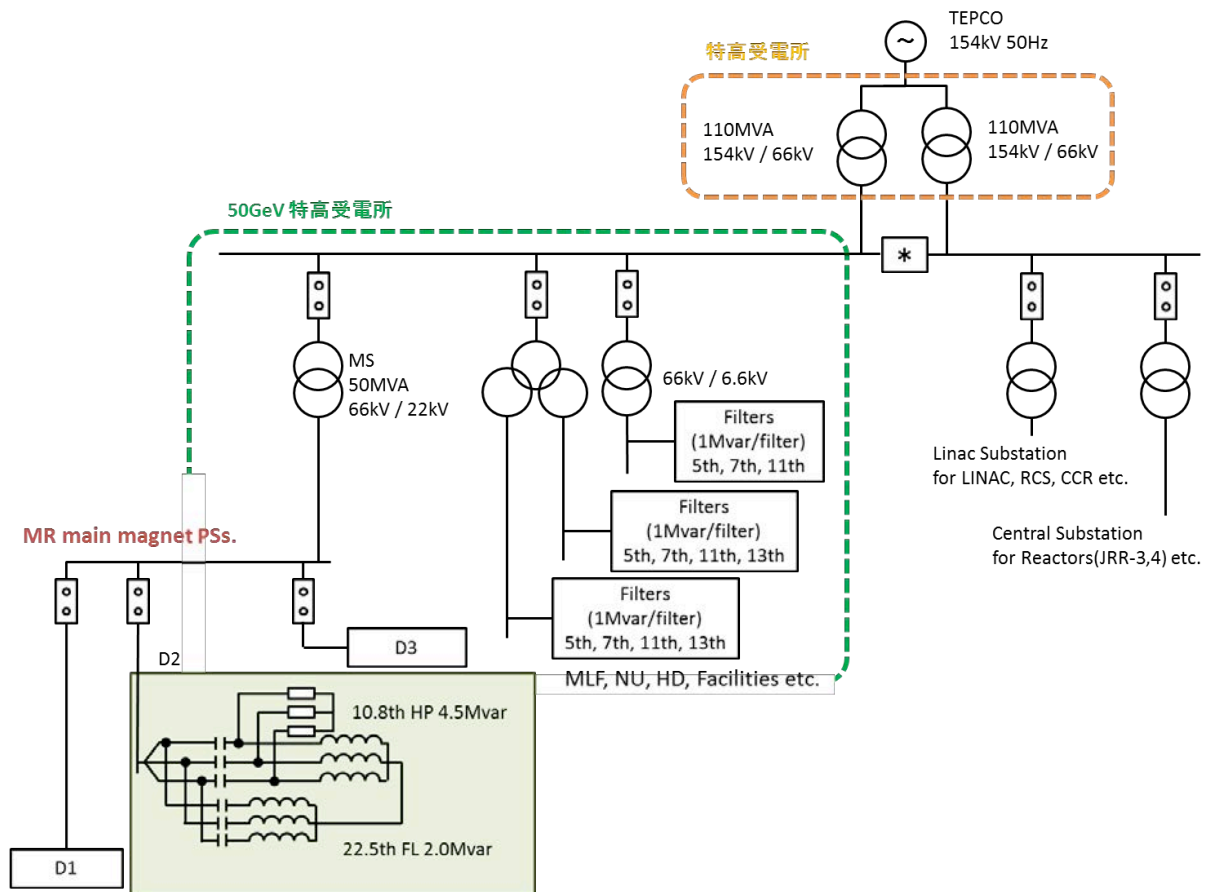


図 3.1 J-PARC 交流受電システムの概略図

図 3.2 に主電磁石電源のブロック図を示す。三相 22 kV(または 6.6 kV)をトランスで降圧した後、変換器によってパターン電流に変換している。この方式は、一端 AC-DC

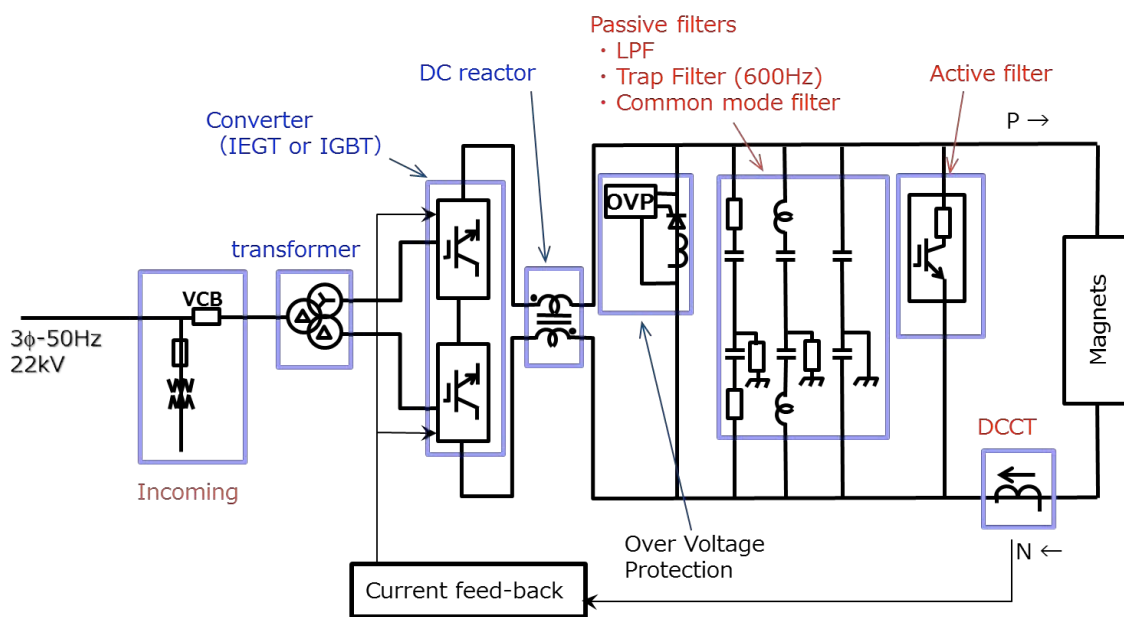


図 3.2 主電磁石電源のブロック図

変換してバンクコンデンサに蓄電し、それを変換器によってパターン電流とする方式に比べて、バンクコンデンサや変換器一式分のコストを下げられる利点がある。その一方で電源が交流系統と直接エネルギーのやりとりを行うため、パターン電流の力行と回生の時に交流系統に電力変動を与えることになる。

現行の電磁石電源によって繰り返し周期を短縮する際に、パターン運転に伴う交流系統の電力変動が問題となることは上で述べた。この問題は原研東海内にとどまらず、電力の供給元である東京電力も関係する。J-PARC のような大電力を消費する施設においては、一般的に供給元の電力会社との間で運用や電力品質維持のための合意書が交わされる。原子力科学研究所と東京電力との間でも J-PARC の運転に関する合意書が交わされており、その中で東京電力との取り合い点において以下のように定められている。現行の電磁石電源においては、これ以上の高繰り返し運転は 2) の電圧変動許容値を超える恐れがあるため、これらの系統影響を考慮した新規電源開発を行う必要がある。

### [3]. 技術的制約条件

甲（日本原子力研究開発機構東海研究開発センター原子力科学研究所）は、原子力科学研究所における試験装置（主に J-PARC）の運転にあたり、系統運用の円滑化ならびに電力品質を確保する為、以下の許容値を遵守するものとする。

#### 1) 系統周波数変動許容値

0±0.2 Hz 以内

#### 2) 村松北線系統電圧変動許容値

0±1% 以内

#### 3) 村松北線高調波電圧・電流の許容値

- ・ 高調波電圧；各次高調波電圧含有率は 0.5% 以下

また、総合では 1% 以下とする

- ・ 高調波電流；各次調波の流出電流抑制値は、次表による

[受電電圧 154 kV, 契約電力 1 kW 当たり (単位：mA)]

次数	5 次	7 次	11 次	13 次	17 次	19 次	23 次	23 次超過
抑制値	0.25	0.18	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05

## 4. それぞれの方式

### 4.1 キャパシタ方式

#### 4.1.1 特徴

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以外に、コストの大幅な削減も意味している (後述)。また、図 4.1.1 に示した保安機構により、内部短絡による事故の可能性は限りなくゼロになっている。実際、高エネ研と共同で開発を行っているコンデンサメーカーでは同様の方式のコンデンサを 2002 年から鉄鋼 INV 用、鉄道車両用に約 8 万台出荷しているが、現在に至るまで事故の報告を受けていない。

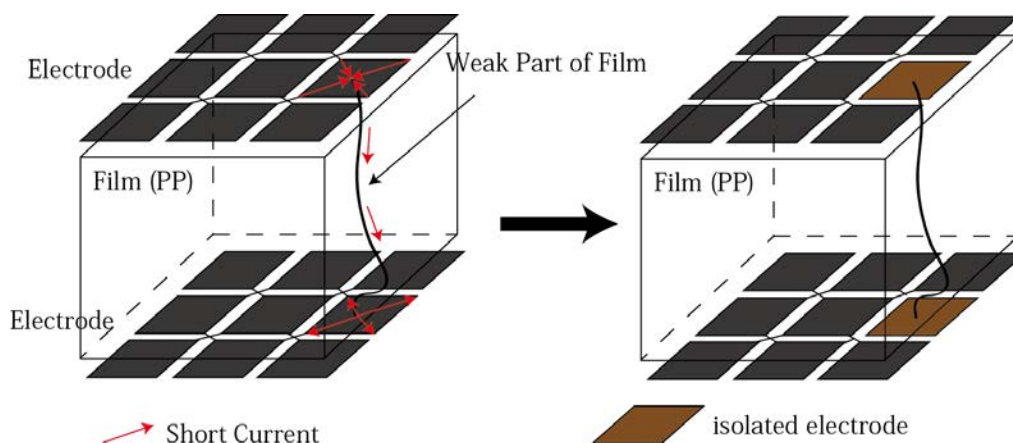


図 4.1.1 フィルムコンデンサの保安機構: 電極はピクセル状のものが細い線で接続された構造になっている。これによりフィルム (ポリプロピレン) の欠陥部分に短絡電流が流れても、それが十分に大きくなる前にピクセル接続線が切れ、欠陥部分は切り離される。結果として静電容量が  $10^{-4}$  程度失われる。

加速器電源としての運用実績としては、CERN-PS の新電源でコンデンサ方式が採用され (旧電源は MG 方式)、既に運用が開始され一年間無事故である (現在は LHC のエネルギーアップグレードのため停止中)。

#### 4.1.2 回路方式

ここでは、大型負荷用の BM(6 台)、QFN, QDN, QFX, QDX 電源に限って論じる。

その他の小型電源に関しては 1 秒繰り返し時のトータルの電力変動が 10 MVA 程度であり、必ずしもエネルギー貯蔵装置を必要としないので本報告では省略する。



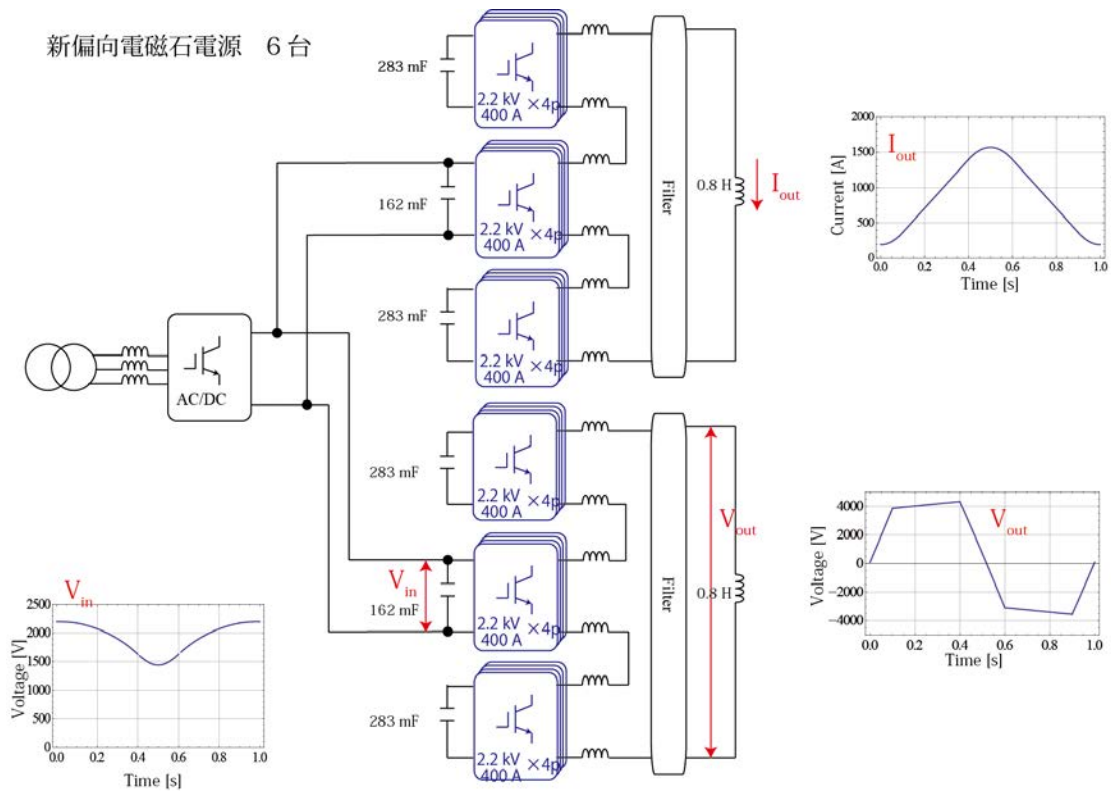


図 4.1.2 新偏向電磁石電源の回路構成

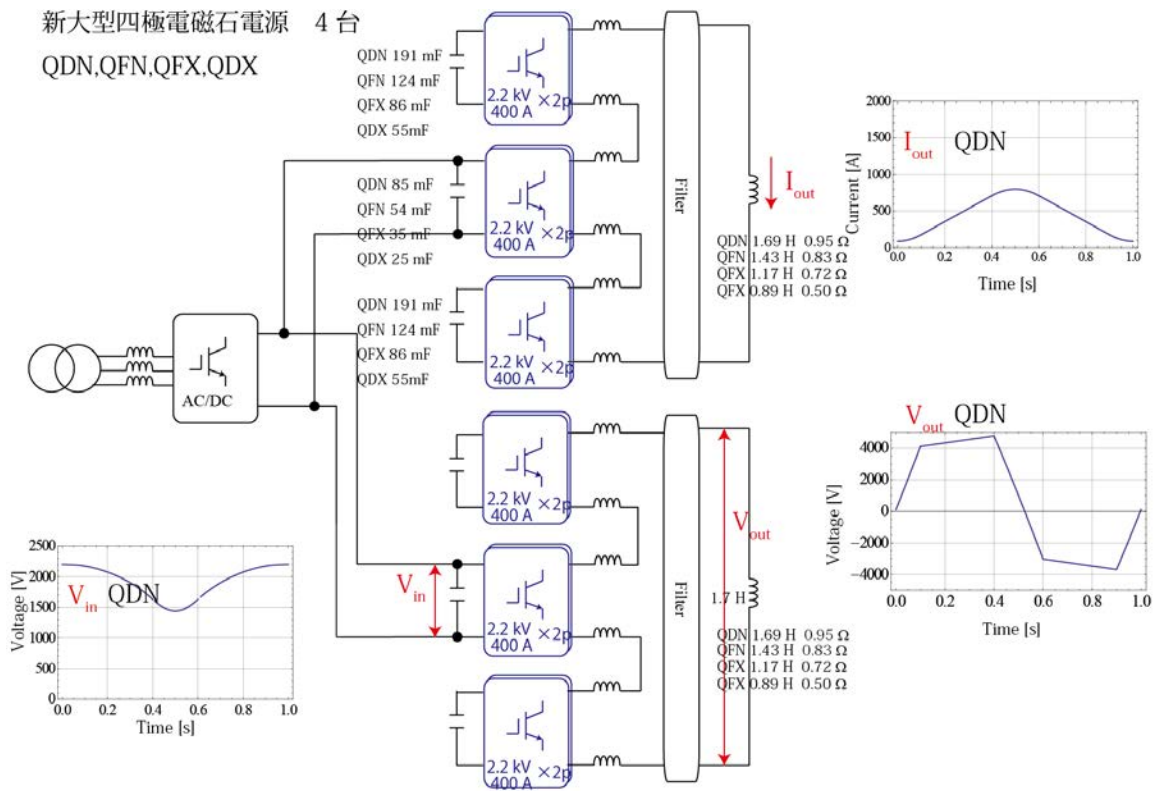


図 4.1.3 新大型四極電磁石電源の回路構成

図 4.1.2 に BM 電源の回路構成，図 4.1.3 に QFN，QDN，QFX，QDX の回路構成をそれぞれ示す。この回路方式は 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されるため（直流補償），トランスや AC/DC コンバータには容量を小さくできる大きなメリットがある。図 4.1.4 に偏向電磁石電源に於けるコンデンサバンクを用いた時の出力パワーと入力パワーの比較を示した。出力パワーは 10 MVA であるので，もし交流補償を考えた場合 10 MVA の充電器を用意する必要がある。一方でバンクコンデンサを用いた場合は，2 MVA 程度の充電器で事足りる。

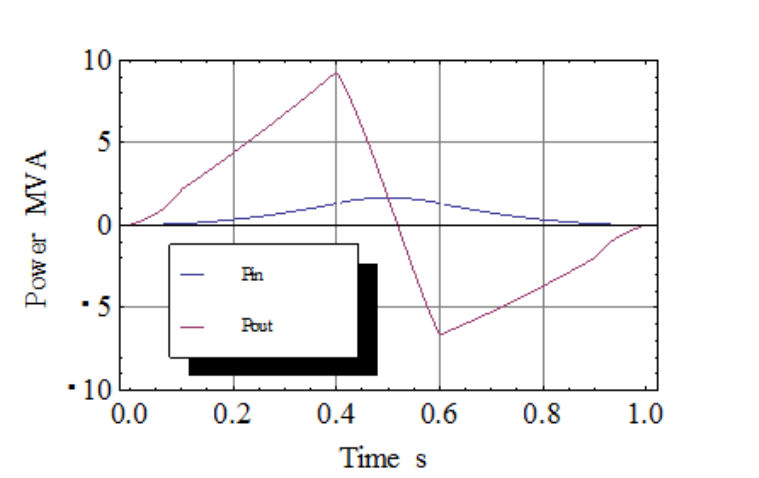


図 4.1.4 コンデンサバンクを用いた時の入力パワーと出力パワーの比較（偏向電磁石電源）

また，図 4.1.2 および図 4.1.3 から分かるように，出力部では 2.2 kV のチョップを複数台直列にしている。これは以下に述べるビーム運転からの要求であるリップル上限と，現実的に開発，入手可能なチョップという二つの観点から採用された構成である。出力リップルは  $10^{-6}$  台に抑えることが要求されているが，そのためには，出力フィルタのサイズを適当に選んだ場合，5 kHz 以上のスイッチング周波数のチョップを用いる必要がある（シミュレーションによる検討。本報告では割愛）。しかし，その周波数帯で使用できる半導体素子は 1.7 kV 以下のクラスに限られ，それ以上の高耐圧素子は損失が大きいため 1 kHz 以下でしか用いることができない。一方，大型負荷を 0.5 秒でドライブ（1 秒繰り返す）するには，6 kV 程度の出力が必要である。そこで，1.7 kV 素子を用いた NPC（Neutral Point Clamped）方式のチョップを 3 台直列にするデザインを採用した。詳細は他の文献に譲るが，NPC 方式ではスイッチング素子を内部二直列にできるので，1.7 kV 素子でも 3.4 kV まで耐圧を上げることができる。この耐圧に対してマージンをみて定格 2 kV 程度のチョップとして使用する。

### 4.1.3 進捗状況

#### (a) 単機コンデンサの開発

コンデンサ方式を検討するにあたって、10年以上連続して使用可能であることを条件に開発を行ってきた。1秒繰り返して、年間5000時間を仮定すると、 $1.8 \times 10^8$ 回の充放電が行われる。本コンデンサは、保安機構により欠陥部分のコンデンサが徐々に切り離されていくため静電容量は時間とともに低下する。そのため、ここではコンデンサの寿命は静電容量が5%低下する時間と定義した。これは、最も頻繁に使われる保安機構付コンデンサの寿命の定義である。

ここで重要になってくる概念が図4.1.5に示す直流電圧用コンデンサと交流電圧用コンデンサの違いである。直流電圧用コンデンサはピクセルが細かくフィルムあたりの印加電圧を大きく(200-270 V/ $\mu\text{m}$ )できる特徴がある。一方、交流電圧用コンデンサは電圧変化時に電極端面で部分放電がおきるため、ピクセルのサイズを大きくする必要がある。その分、保安機構の安全性が低下するため、フィルム当たりの電圧は小さくする必要がある(100 V/ $\mu\text{m}$ 以下)。このように交流用のコンデンサは印加電圧が半分以下になるため、重量としては4倍以上になりこれはコストや設置スペースの観点から許容できない。

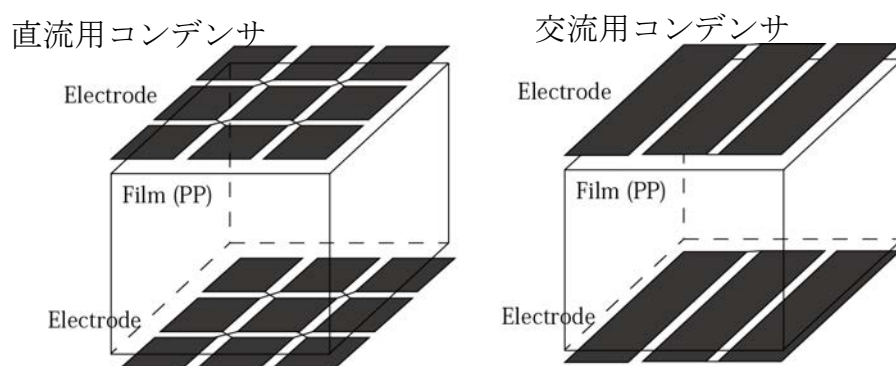


図 4.1.5 直流用コンデンサと交流用コンデンサの違い。交流コンデンサはピクセルが大きいため、フィルム当たりの電圧を下げる必要がある

しかし、ここでいう「交流用」とは商用周波数50/60 Hzで電圧の極性も変化する。一方現在進めている仕様は図4.1.2および図4.1.3の $V_{in}$ のグラフに示すように変動が1 Hzで極性は変化しないので、電圧変動という観点では、一般の交流電圧に比べて大幅に少ない。このような状況から、我々は直流用コンデンサをベースに開発を行った。具体的には、電極の材質やパターンの形状を変えて、電圧や周波数を上げた加速試験により静電容量の時間変化を観測し、我々の1 Hzの定格運転時の寿命を算出した。その結果、 $4.5 \times 10^8$  充放電（十五年）以上の寿命が期待できる単機のコンデンサの開発に成功した。

図 4.1.6 に周波数を 60 倍にしたときの加速試験の測定データを示す。ここでは電極の材質を変えた試験を行っており，蒸着金属 B を採用した。

図2. 蒸着金属違いにおける影響確認

試験温度70℃/60Hz/電圧200VAC

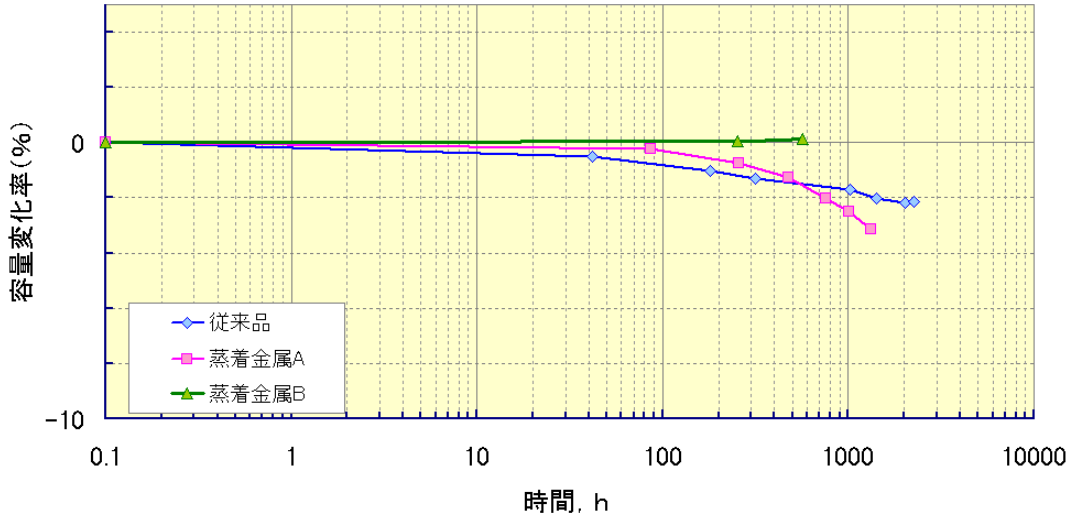


図 4.1.6 蒸着金属による寿命の違い（周波数 60 倍加速試験）。

完成したコンデンサの仕様は，2.5 kV，2 mF で重量 29 kg としており，現在担当している電源メーカーの承認も得ている。表 4.1.1 にこの単機コンデンサを使用したときのコンデンサの台数及び重さを示す。

表 4.1.1 コンデンサの台数および重量

	静電容量/ 電源	コンデンサ台数/ 電源	コンデンサ質量/ 電源	コンデンサ容積/ 電源	電源台数
BM	1456 mF	728	21 トン	150 m <sup>3</sup>	6
QDN	934 mF	467	14 トン	93 m <sup>3</sup>	1
QFN	604 mF	302	9 トン	60 m <sup>3</sup>	1
QFX	414 mF	217	6 トン	41 m <sup>3</sup>	1
QDX	270 mF	135	4 トン	27 m <sup>3</sup>	1

(b) コンデンサバンクの設計

現在, 上で示した単機コンデンサをつかったコンデンサバンクの設計を電源メーカー主導で行っている。バンクを設計するに当たり，もっとも重要なことはヒューズの割り当てである。細かい単位でヒューズを入れれば，解放される静電エネルギーも限定されるためより安全であるが，ヒューズのコストがかかってしまう。後述する 2014 年のプロトタイプ試験では，図 4.1.7 のように単機コンデンサ 4 個あたりにヒューズを一つ挿入する設計としている。単位コンデンサ 4 個のエネルギーは 25 kJ である。これは，TNT 火薬 6 g 相当するので，仮にコンデンサが短絡した場合でも被害は非常に限定的である。

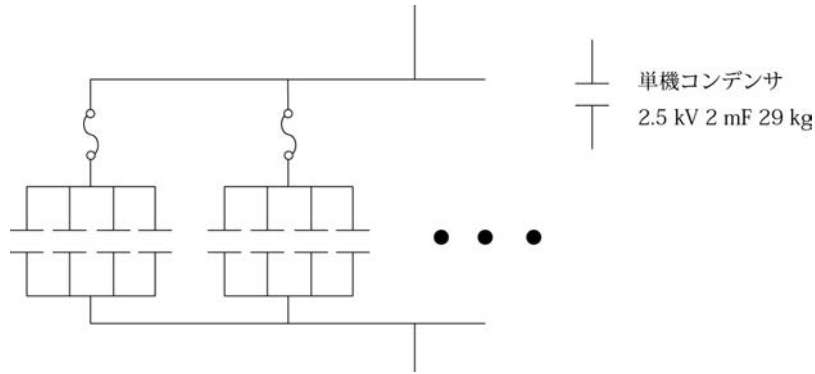


図 4.1.7 コンデンサバンクおよびヒューズ

(c) 2014 年度プロトタイプ試験

2014 年度にはコンデンサ方式電源のプロトタイプ試験を行う。図 4.1.8 に詳細を示す。現段階で、制御システム、AC/DC コンバータ等、出力の NPC チョップパ以外の開発は完了しており、すべて 2013 年度末に納品予定である。出力の NPC チョップパも KEK 試作品の試験を終了しており、2013 年度前半は NPC チョップパとして KEK 試作品を用いた電源のプロトタイプ試験を行う。そのプロトタイプ試験とは平行に量産型の NPC チョップパの開発を 2013 年度中に完了させる。このようにして、すべてのコンポーネントが 2014 年度中に量産可能な形でそろそろ。なお、制御システムおよびそのアルゴリズムに関しては、10 kW 程度のミニ電源を用いて十分に検証している。これに関しては本報告の範囲を超えるので割愛する。

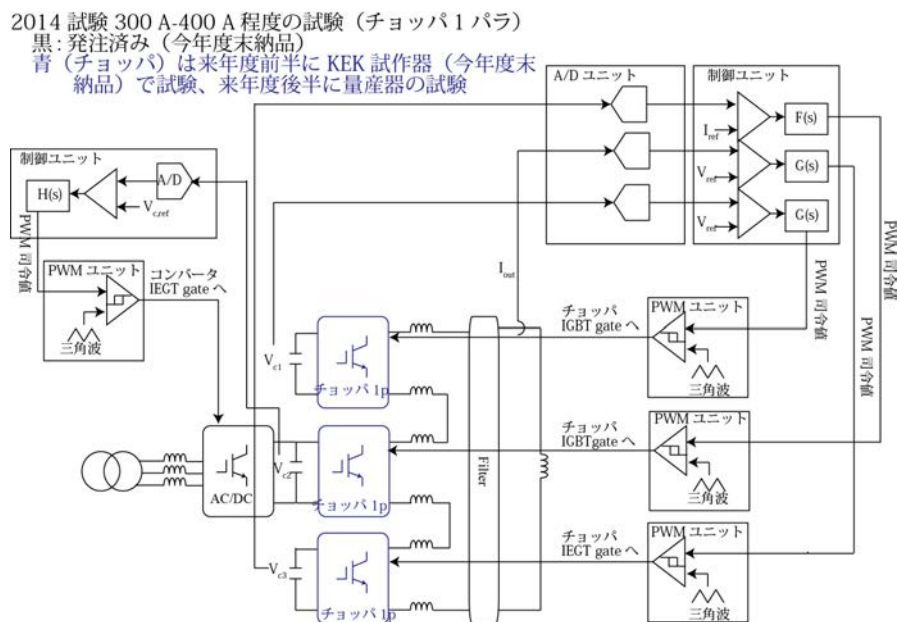


図 4.1.8 2014 年度プロトタイプ試験のブロック図

## 4.2 FW 方式

### 4.2.1 特徴

フライホイールは昔から繰り返し作られ、利用されてきた実績がある。特に大きいフライホイール電力貯蔵装置があるのは核融合実験装置など強力な磁界が必要な施設である。核融合実験装置は粒子加速器と共通した特徴があり、その適用が有力視されてきている。最近に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た。電力分野では、ROTES：周波数を安定にしたい沖縄電力株の例、電力系統 50 Hz, 60 Hz の周波数変換所の直流から交流への変換時、交流電力バックパワー増強のために、新信濃変電所に設置されて 50 年近く使われてきた。最近では風力発電の動揺安定化、停電、電圧低下対策として小型のフライホイールも注目されている。フライホイールは大気中で回転に伴うロス：風損が大きく、エネルギー蓄積時定数  $\tau = W_e / P_{\text{loss}}$ ： $W_e$  は蓄積エネルギー、 $P_{\text{loss}}$  は失うエネルギーであるが、世界最大の 8 GJ 蓄積の JT-60 核融合電源フライホイールでも 1 時間程度である。すなわち長時間の蓄積には向かないのであるが、フライホイールの軸に発電機／電動機と組み合わせて 50 万 kW もの大電力を繰り返し充放電することが可能で先の核融合用は 30 年もの間、問題なく性能を発揮している。フライホイール電力貯蔵については文献参照。

今回、J-PARC の予想される電力の振り幅は 1 章によれば 140 MW になる。これは沖縄の ROTES が 30 MW の出力であったから、相当大きな発電・電動機を要することになる。発電機の出力変動は、プラス 50 MW、マイナス 50 MW と仮定して、以下、検討をすることにする。エネルギーは磁気エネルギーの最大が 20 MJ 程度であって、運転周期には因らない。この程度であれば発電機の回転子：ローターの持つフライホイール効果で十分で、特にフライホイールを用意する必要がない。JT-60 のポロイダル磁場コイル電源の発電機は 500 MW で充放電エネルギーは 1.3 GJ であるがフライホイール無しで済んでいる。50 MW の発電機のフライホイール効果は慣性定数の原理から発電電力に比例するとしても 130 MJ はあると思われる。ここで変換ロスをいれて 30 MJ を充電・放電するとして周波数の変化は JT-60 の場合、80 Hz から 56 Hz の変化であったから、30 MJ 充放電での周波数の変化は約 5 Hz である。

### 4.2.2 回路構成

フライホイール電力貯蔵は電動機／発電機の出力周波数が電力系統と同じ 50 Hz と 60 Hz の間の発電機には変換器が不要で、3 相交流電力のまま利用可能なところは大きな利点である。沖縄の ROTES のような可変速同期発電機では、入出力の周波数を一定とすることができるが、ここでは発電機が系統に直接接続することは無いのでコストの高い交流励磁の巻線型誘導発電機は採用しない。50 と 60 Hz の間を数秒かけて緩やかに変動する電力系から低コストの受電変圧器によって、それぞれ磁場コイル電

源に必要な電圧に変換でき、かつ、接地電位の絶縁も出来るのでノイズ対策も容易である。

同期発電機は、効率が良いのだが並列運転は動揺振動が発生して困難である。ここでは新しい提案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にしたい。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は定格の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台接続しておくが、これは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。

交流系構成の概念図を以下に示す。ここでは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。最大電力が必要な時だけ全数を並列運転することで、運転電力の削減も図れる。基本構成を図4.2.1に示す。

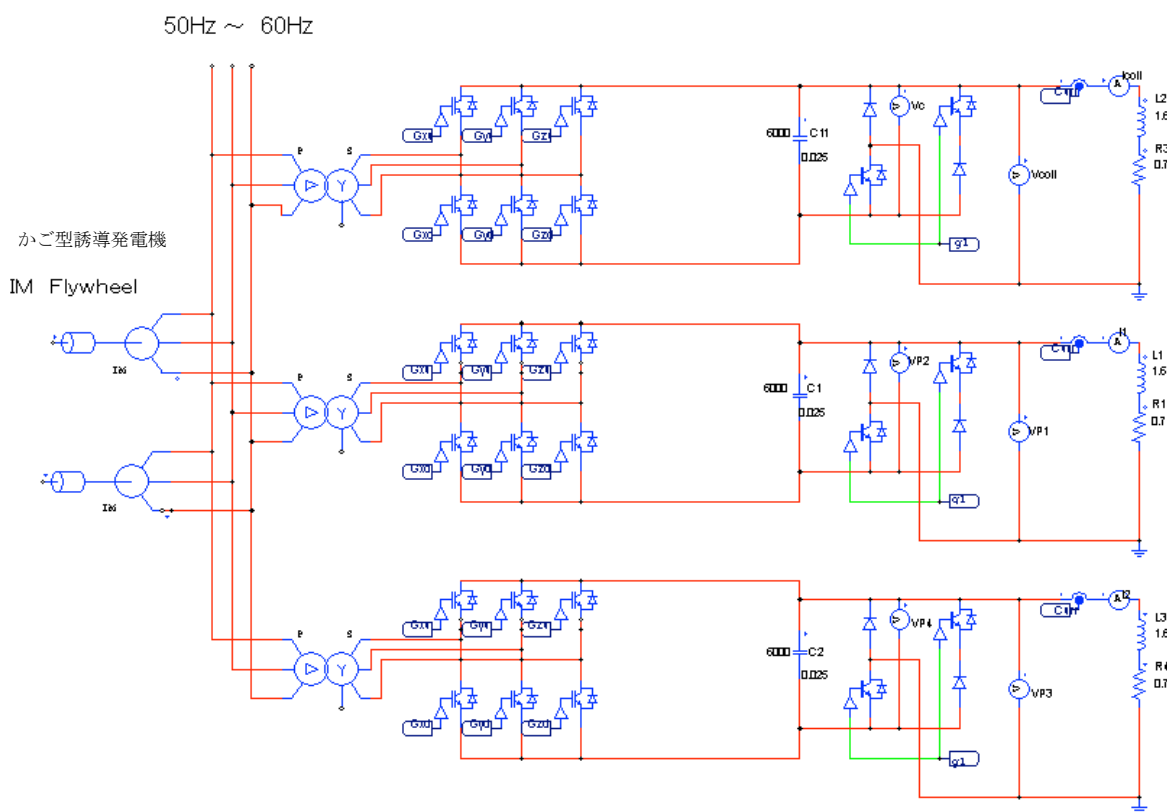


図 4.2.1 フライホイールエネルギー貯蔵による J-PARC 主リング電源電力変動補償構成の基本構成

磁界コイルの電力は発電機から変圧器+電圧型インバータ・コンバータを介して直流電圧になる。この電圧源コンデンサは従来の誘導電動機駆動用の大きさで良い。この電圧をコイルに必要な電圧に維持するためにインバータは時にコンバータ、可逆の動作を行う。この電圧はほぼ一定に維持されれば良く 10 ms 程度の制御おくれは問題ない。コイル電流の精度は、最終段に電流制御用の高速チョッパで行うからである。

高速チョッパは電流方向が1方向なのでアームの半分はダイオードで足りる。これは誤点弧によるアーム短絡事故の可能性は減るので電源の信頼性が上がる。

1台のMR電源 (1.6 H, 0.7 Ω, 1600 A) の場合のシミュレーション結果 (ここではチョッパによるヒステリシス制御) を図 4.2.2 に示す。

この方式は産業用電動機駆動用のインバータをそのまま利用することが可能で高速チョッパのみをコイル電流制御のために開発することで足りる案である。しかし、欠点もある。コイル電流制御のためのチョッパの電圧源コンデンサの必要電圧を発電機駆動用のインバータもまた持たなければならない。変圧器で必要な電圧にすることで電圧を高くすれば、電流が小さくなるので良いのだが、設備容量としては最大電流と最大電圧の積になるので、変換器の容量、特に発電機インバータの容量が大きくなる。また、現実的には半導体スイッチの耐電圧が問題になる。対策として低速低圧電源と高速高電圧の電源のハイブリッド加速器用磁場コイル電源を図 4.2.3 で提案している。これはコンデンサバンク型の電源にも、高電圧でコンデンサが小容量の電源と低速で大容量の電源とに分けて構成することが可能である。これによって、発電機側インバータの電圧を小さくできるので変換器の容量は下がる。このようにすれば J-PARC の低速電源としては現在の電流型電源を再利用することが出来るので現実的増力案である。

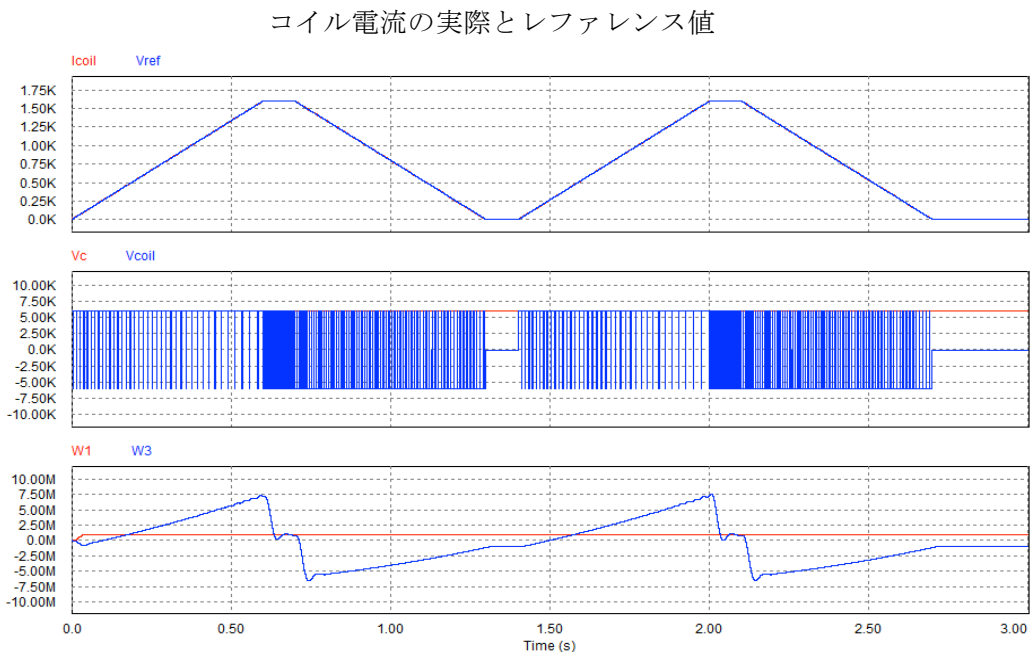


図 4.2.2 1台のMR電源 (1.6 H, 0.7 Ω, 1600 A) の場合のシミュレーション  
W1 : 平均電力, W3 : インバータ出力, ピーク値は +7.5 MW, -7.0 MW



## 低速電源は10mSの変化速度 高速電源は+-4kVのステップアップダウン

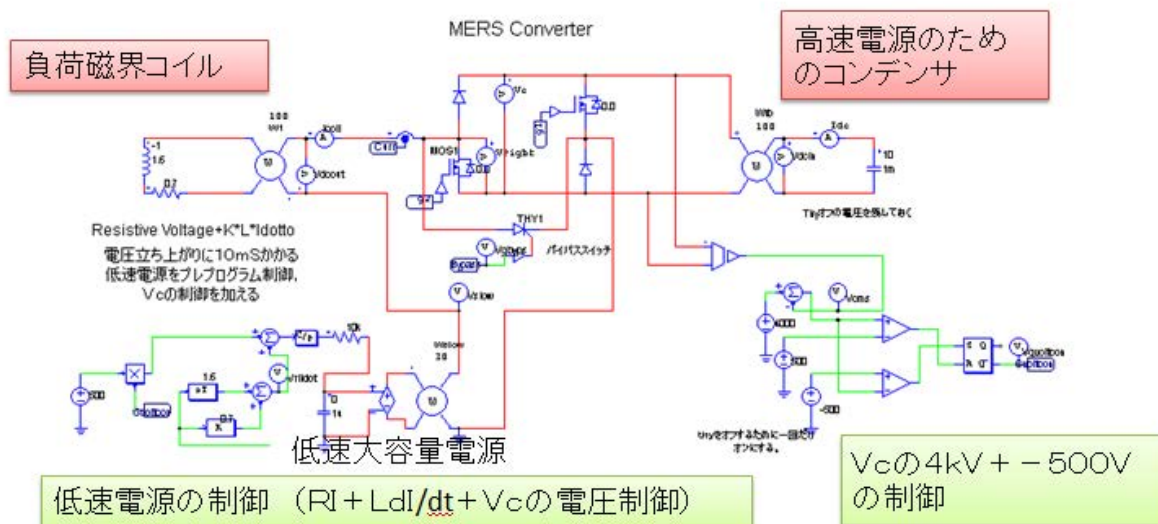


図 4.2.3 低速低圧電源と高速高電圧の電源のハイブリッド加速器用磁場コイル電源

### 4.2.3 低速・高速の直列加速器用磁場コイル電源

核融合では、コイル電流 3 ms の制御スピードで精度 0.1%がサイリスタ変換器で実現しているが、加速器磁界では、スピードは応答時間 0.1 ms で 30 倍、精度はさらに数ケタ高める必要がある。高速制御の電源が現在利用可能な半導体デバイスの耐電圧の関係で直列にする必要があるが、それをモジュール化した高速制御ユニットを直列接続する場合にも役立つものである。1 台の高速高圧チョッパで必要な電圧を PWM 制御で作るよりも、直流送電の DC/AC 変換に直列接続の MMC (Multi-Modular-Cell) が検討されているが、その磁場コイル制御版である。これは MMCh (Multi-Modular-Chopper) である。

### 4.2.4 動作

低速電源はコイル電流の基本的電圧、すなわち抵抗分とインダクタンス分の電圧を発生する。これだけではコイル電流の精密制御には不足する。電流の擾乱に対処するため、高速制御のため必要な電圧は運転に必要な電圧より大きい、その電流増減分は小さく、エネルギーが必要な電源ではないので電圧源コンデンサは最小限で足りる。

MR コイル 1 台分のシミュレーションの結果を図 4.2.4 に制御開始時を示すが、磁気エネルギーを回生して電圧源コンデンサを充電しながらコイル電流を高速制御することが可能なことが示されている。低速電源はその電圧源コンデンサの電圧を維持することにもつぱら動き、電流の制御は高速高電圧なチョッパが行えば良いのである。

## 制御開始時 制御用コンデンサが充電される。

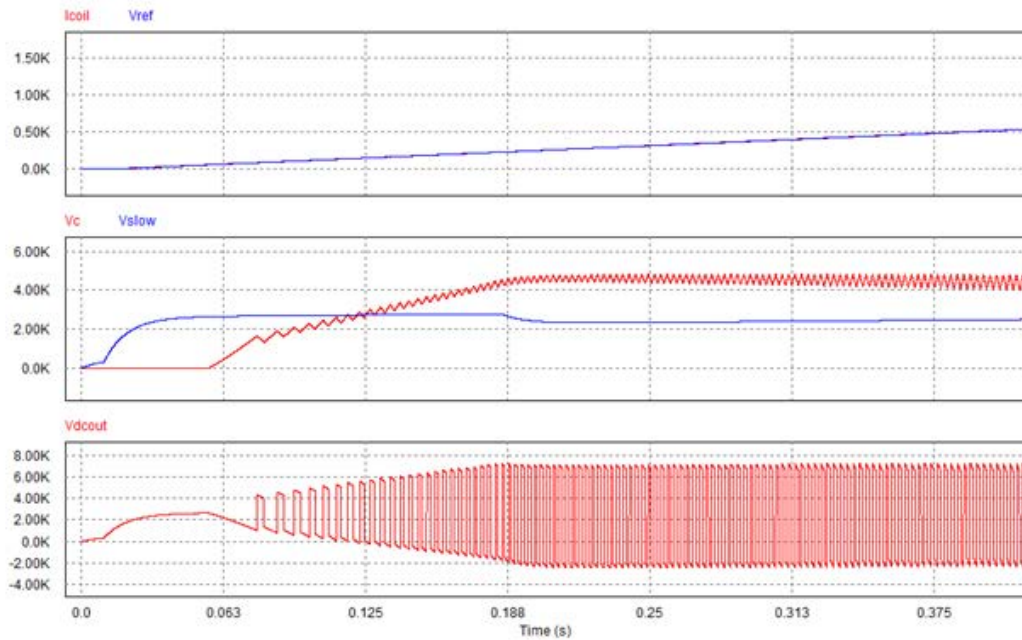


図 4.2.4 MR コイル 1 台分のシミュレーション：制御開始時

## 1. 2秒で1.6KAまで直線上昇

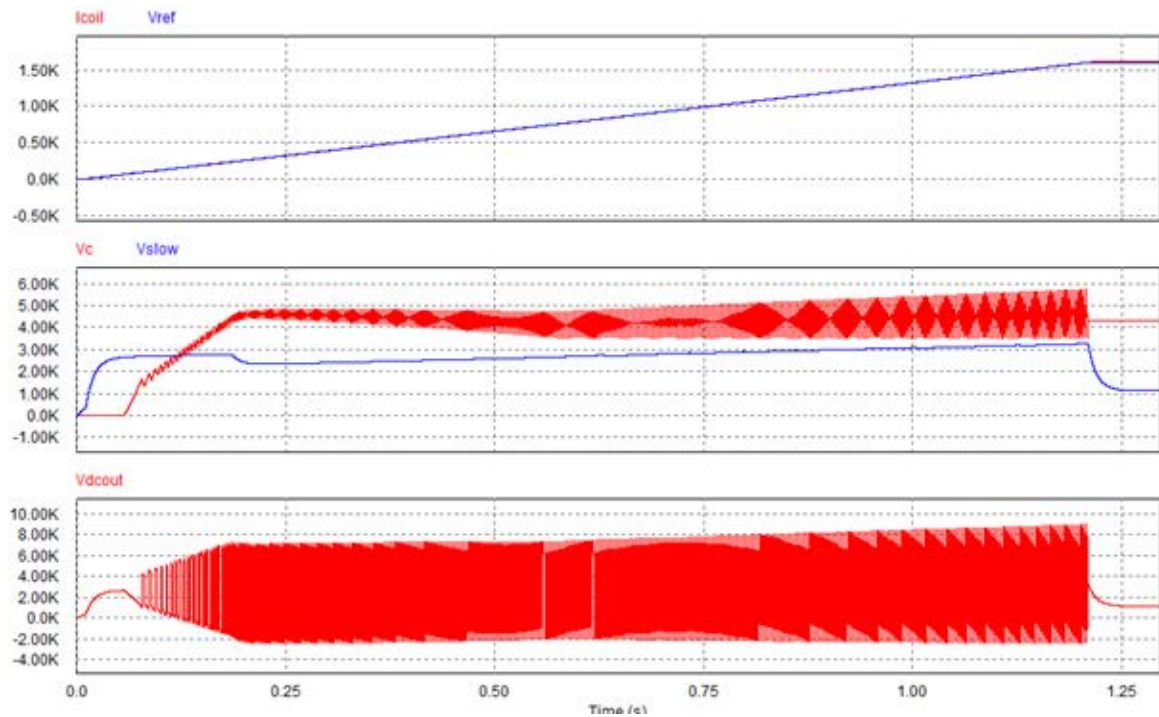


図 4.2.5 全体運転のシミュレーション結果

全体運転のシミュレーション結果を、図 4.2.5 に示すが、電流が流れだすと電圧源コンデンサが直流電流を介して充電される。コンデンサ電圧は 5 kV になり、この電圧がコイル電流の制御に使われる。シミュレーション結果に示すように、 $V_{slow}$  の電圧は 2 から 3 kV であるが、電圧源コンデンサの 5 kV が上乘せされてコイルには合わせて 7~8 kV の電圧が発生し、制御された結果、電流波形はきれいにレファレンスと実電流が重なって見える。

図 4.2.6 に低速電源にフライホイール方式を採用し、高圧高速チョップ 2 段を直列に接続する高圧電源を半導体デバイスの作りやすさに応じてモジュール化して、必要な電圧まで直列接続する構成を示している。

$C_{m1}$  の電圧と  $C_{m2}$  の電圧のアンバランスが生じる場合がある、パルスの幅を調節して蓄積電圧を調整する。

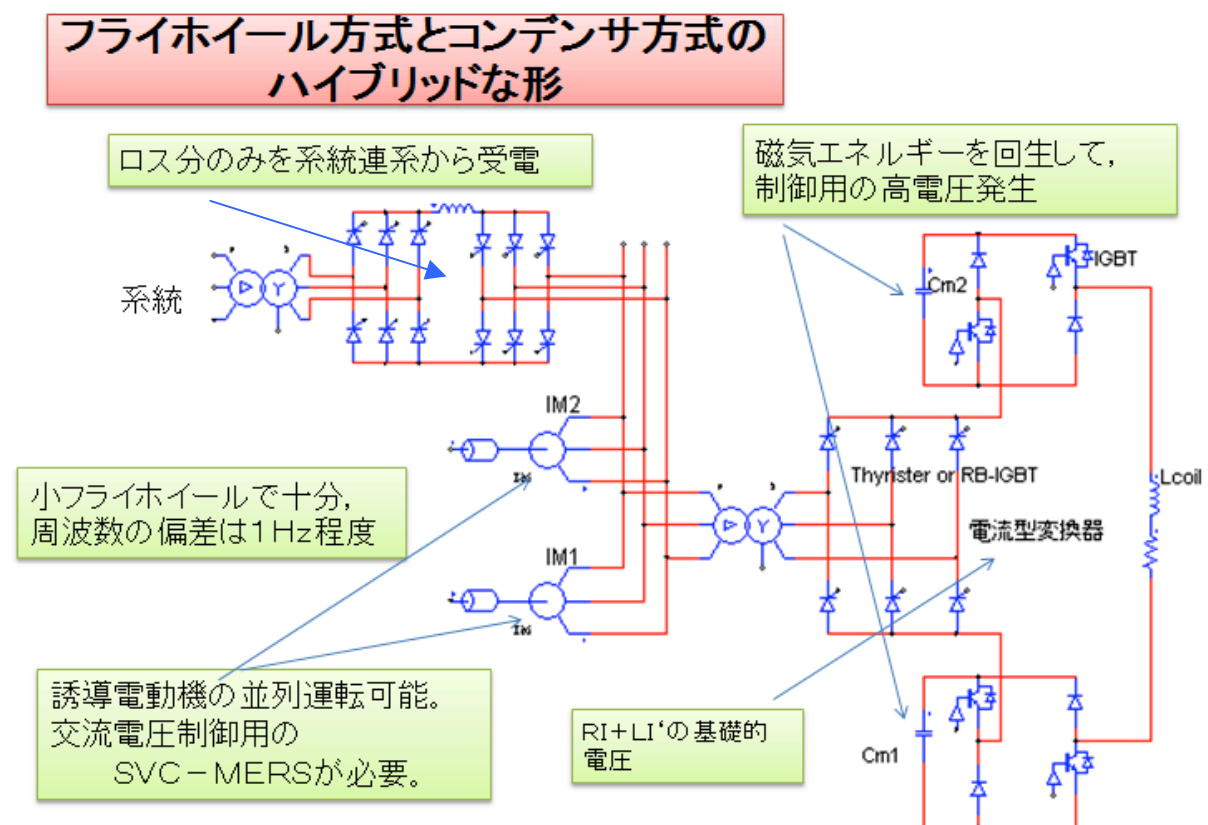


図 4.2.6 フライホイール方式とコンデンサ方式のハイブリッドな形

## 4.3 SMES方式

### 4.3.1 特徴

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。こりにより、磁気エネルギーとして電力が保存された状態となる。これが超電導エネルギー貯蔵の原理である。

SMESコイルに貯蔵されるエネルギーは、コイルのインダクタンス ( $L$ ) と通電電流 ( $I$ ) で決まり、 $(1/2) L \cdot I^2$  のエネルギーを貯蔵することができる。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高く、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。また、目的に応じた必要貯蔵エネルギー量で、その貯蔵部を構成できるという特徴を持つ。例えば、瞬低補償であれば1秒も出力できればよく、SMESでは1秒間に大出力できるだけのコンパクトな貯蔵部が実現できるが、二次電池のような貯蔵技術では大出力化のために電池の直並列数を増加させねばならず、結果として数時間以上大出力可能な大容量の貯蔵部となってしまう。

図4.3.1にSMESのエネルギー充放電原理を示す。電力系統と超電導コイルの間には、交流と直流を変換する電力変換装置は遮断機を持ち、超電導コイル充電時には超電導コイルと電力変換器で閉回路を構成し、コイルに電流を流し続けることでエネルギーを貯蔵する。放電時には超電導コイルと変換装置の回路を閉じ、コイル電流を外部にエネルギーとして取り出す。

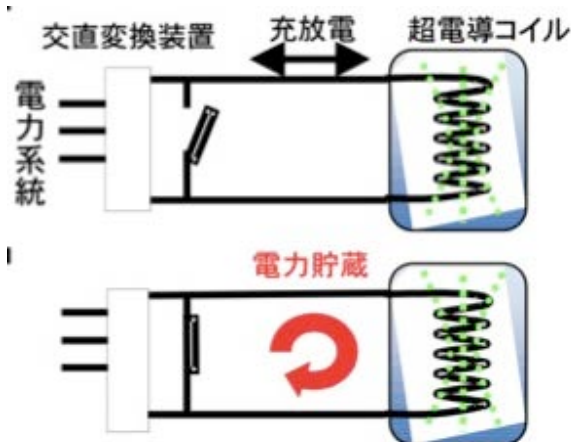


図 4.3.1 SMES のエネルギー充放電原理

### 4.3.2 SMES 開発の変遷

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、貯蔵容量が数百 MWh から数 GWh 級の開発が目標とされた。しかしながら、このような揚水発電の代替も視野に入れた大型 SMES は、その実現に多くの課題があり、例えば、コイルが発生する電磁力支持に地下の岩盤利用も想定するような SF 規模の検討が必要とされた。そこで、まず市場ニーズもあり、技術的に実現可能な SMES とするために、秒単位の入出力となる系統安定化用や瞬低補償用の SMES の開発が進められた。図 4.3.2 に開発の変遷を示す。揚水発電所を代替する大規模の貯蔵技術を求める声がないわけではないが、最近では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して、発電変動や周波数変動を吸収する用途への SMES 適用が期待されている。

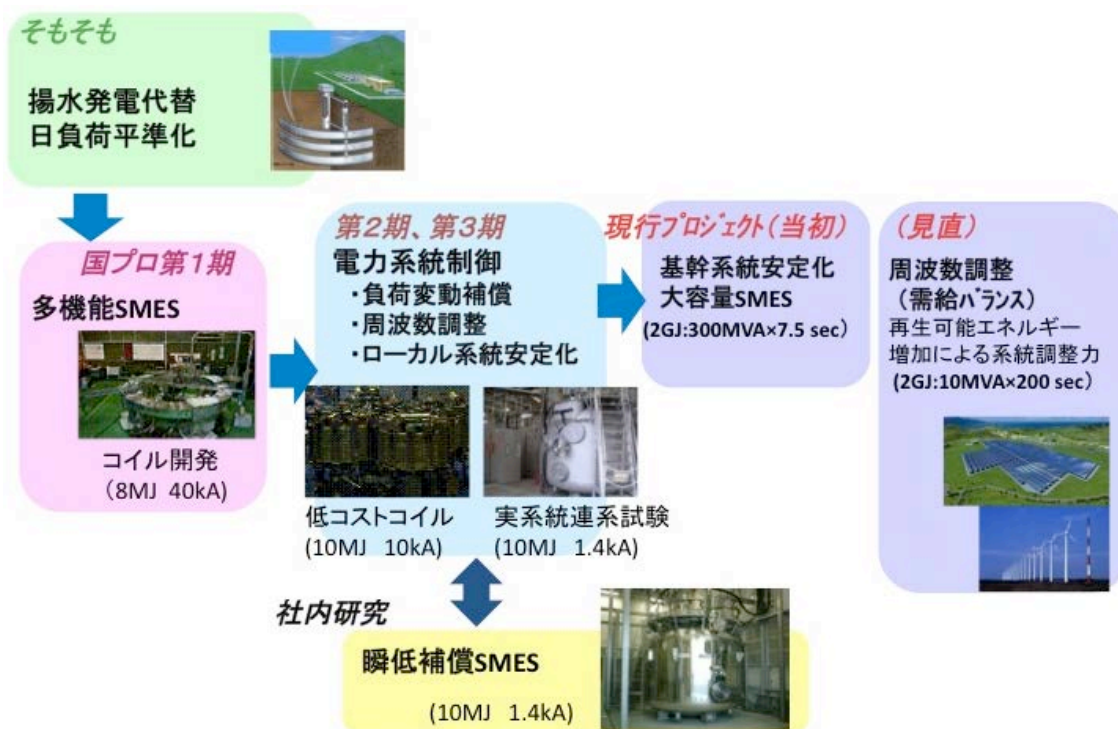


図 4.3.2 SMES 開発の変遷

### 4.3.3 SMES 開発動向

SMES の研究開発は、1970 年代初頭の米国 Wisconsin 大学の揚水発電代替の大規模 SMES (18~36 TJ (5~10 GWh)) の概念設計に端を発し、それ以降、国内外で種々の研究開発が行われてきた。欧米では、米国企業の 1~3 MJ 級の金属系 SMES が瞬低補償用等に一部導入された実績がある。最近、米国では平成 22 年度から、イットリウム系超電導線材を用いた 3.4 MJ @ 4.2 K & 30 T の超高磁場 SMES の開発が 3 年計画で開発されており、ABB 社が主体で SuperPower 社、ブルックヘブン (Brookhaven)

国立研究所が開発を推進している。フランスにおいても電磁推進用パルス電源として SMES の開発が行われており，Bi 系超電導線材を使用して 0.8 MJ 級のコイル製作評価が実施されている。

韓国では国家プロジェクトにおいて 2.5 MJ 級の SMES が開発中である。日本が設計した結果と同様に，多分割であるトロイド形状が検討されている。中国やインドも MJ 級の金属系 SMES が既に開発されている状況にある。

最近の海外での SMES 開発は，高温超電導材料を用いたものが主流となってきている。しかしながら，10 MJ 級の金属系 SMES によるコイル技術の確立や酸化物系 SMES コイルの研究開発水準から見て，我が国が圧倒的にリードしている状況である。日本における本格的な SMES 開発は，資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして電力系統制御用 SMES の開発が，1991 年から産学官を上げて始められた。また，同プロジェクトで超電導コイルのコスト低減に目処が立ったことから，瞬時の放電動作のみでその責務を果たすことができる瞬低補償システムが実用化されている。以下，瞬低補償用と電力系統制御用の SMES 開発状況を簡単に紹介する。

#### (a) 金属系 SMES の開発

##### ・瞬低補償用 SMES

SMES は，瞬間に大電力の台仕入れが可能で，貯蔵効率も高いことから，瞬低補償用に最適な電力機器である。工場を一括で瞬低補償できる大出力が可能なシステムを実現するため，高压機器と浸漬冷却超電導コイルとして高電圧化を図った固体絶縁コイルを組み合わせ，待機時の損失を低減できる常時商用給電方式を採用するとともに，瞬低発生時の電力系統からの切り換え時間を 1/2 サイクルとした世界最大規模の出力 5～10 MVA，補償時間 1 秒の瞬低補償システムが開発されている。インバータやモー

表 4.3.1 10 MVA-SMES 商用機の主な諸元

コイル形式	マルチポールソレノイドコイル
コイル个数	4
コイル定格電流	1400 A
コイル定格電圧	DC 6000 V
インダクタンス	21.1 H
蓄積エネルギー	20.7 MJ
最大経験磁界	4.4 T
冷却方式	液体ヘリウム浸漬冷却
定格出力	10 MVA 1 秒
切替時間	1/4 サイクル+ $\alpha$



図 4.3.3 10 MVA-SMES 商用機のエネルギー貯蔵部外観

ター等の多様な負荷が混在した三重県亀山にある最新鋭液晶 TV 工場内にて、平成 15 年 7 月より 5 MVA 機のフィールド試験，平成 17 年 10 月からは 10 MVA 機のフィールド試験が実施された。現在は，出力 10 MVA，貯蔵エネルギー 20 MJ 級の金属系超電導体のコイルを用いた商用機 SMES が同じ場所で実運用されている。商用機のエネルギー貯蔵部外観を図 4.3.3 に，諸元を表 4.3.1 に示す。亀山の瞬低補償 SMES は，フィールド試験期間を含め，これ迄に 40 回以上の瞬低動作が確認されている。現時点で国内には亀山を含め 3 基の商用 SMES が稼働している。

#### ・ 電力系統制御用 SMES の開発

電力系統制御用 SMES 開発は，1991 年から資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして産学官を挙げて本格的に進められた。第 1 期の要素技術開発では，100 kWh 級の多目的 SMES が金属系超電導体を用いて実現可能であることが示されたが，コスト面の課題も明らかになった。引き続き実施された第 2 期の開発（1999～2003 年度）では，超電導コイル部分のコスト低減技術が開発され，超電導コイルは従来の 1/6 のコストで製作可能となる見通しが得られた。定格通電電流 10 kA の大電流コイルを開発し，18 秒周期の変動負荷補償として過去に例のない連続 1 万回の充放電試験を行い，電力系統制御装置としての優れた性能が証明されている。

さらに 2004 年からの第 3 期国家プロジェクトでは，SMES の電力系統制御システムとしての機能検査を目指した開発が行われた。1 万 kW 級（貯蔵エネルギー 20 MJ 級）SMES が実際に製作された。負荷変動による電力系統への影響を低減させる機能

や発電機が停止するなどの外乱により電力系統が不安定となることを防ぐ機能が、SMES を実系統に連系した試験により検証された。システムの鳥瞰図を図 4.3.4 に示す。SMES は栃木県日光市にある古河日光発電株式会社細尾発電所 11 kV 母線に接続され、分岐線の電流、電圧を計測し、隣接工場の電気炉等の運転に伴う有効電力、無効電力の変動を補償するように SMES を運転し、負荷変動補償効果が確認された。また、繰り返し補償動作は、当初の 2 万回以上に対して、5 万回以上の動作実績を残し、耐久性・安定性が確認された。

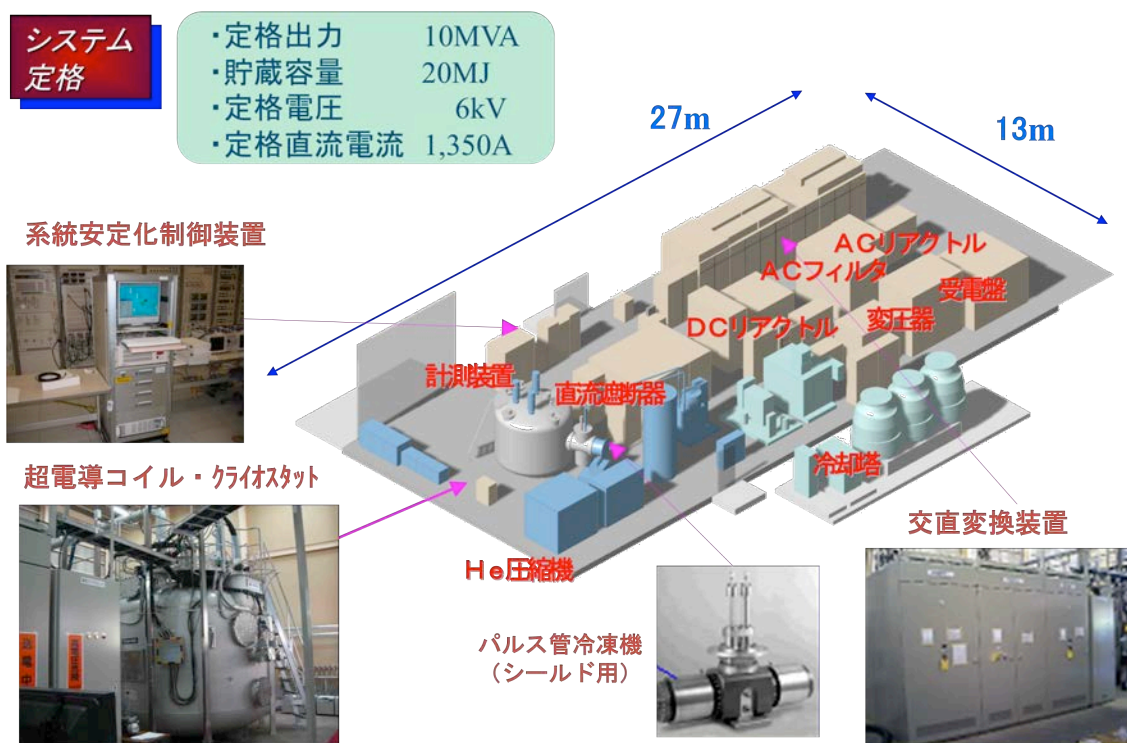


図 4.3.4 実系統連系実施システム鳥瞰図

## (b) 酸化物系 SMES の開発

### ・ 実用化に向けた課題と技術開発項目

これまで紹介してきた SMES は、金属系超電導体を用いたコイルによる SMES であり、超電導状態を維持するために液体ヘリウム温度域 ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) に冷却する特殊なシステムが必要となる。このため、コスト面のみならず運用・保守の面からも制約があり、幅広く普及させるためには、更なる技術開発が求められてきた。また、SMES は、コイル内に磁界として電気エネルギーを貯蔵しており、貯蔵されるエネルギーは発生磁場 ( $B$ ) の 2 乗とコイル半径 ( $r$ ) の 3 乗に比例する。したがって、電力貯蔵量を増大させるためには磁界を高め、コイルを大型にすることが要求される。しかし、現在、実用化されている金属系超電導体の場合、発生する磁場が強いほど超電導状態で通電できる電流値が急激に低下する。さらに、コイルに作用する電磁力は、コイル



の発生磁場 ( $B$ ) と電流密度 ( $J$ ) とコイル径 ( $R$ ) の積 ( $B \times J \times R$ ) で決定される。しかし、高電流密度の通電と強磁場を系の大きなコイルに適用すると電磁力が著しく大きくなるので、作用する応力がコイルの強度を超えてコイルの特性低下や破壊が生じないように、電流密度を低下させるため、通電電流を抑制することも必要となる。その結果、金属系超電導線材を機械強度の理由で大量に使用しなければならないことになる。

高温超電導体、中でもイットリウム系超電導体は磁場中でも通電特性に優れ、SMES の高磁界化が可能で、また線材自体に機械強度の高い基材が使用可能であるため、高磁界化コイルでの課題となる高耐電磁力化が容易となる。他の電力貯蔵技術に比べエネルギー貯蔵密度が低い SMES の高磁界化は、貯蔵密度を高め、これによりコンパクト化を図ることができ、物量低減と冷却システムへの負荷を下げることにより、ランニングコストも含めた大幅なコストダウンが期待される。2008 年から始まった第 4 期の国家プロジェクトでは、このイットリウム系超電導体の長所を生かした SMES 用超電導コイルの構成技術の確立を図り、限界性能を把握することを最終目的とした開発が進められた。以下、その成果を紹介する。

・ 酸化物系 SMES の基礎技術開発

➤ コイル化技術の開発

イットリウム系超電導体は、製造技術の開発・発展により長尺線材が製作されるようになってきたが、コイル化に際しては引っ張りに強いイットリウム系線材が厚さ方向の応力で積層構造の薄膜に剥離が生じるという問題が発生した。そこで、Yoroi (Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated)-coil と称するコイル化技術により、イットリウム系線材の弱点を克服して高強度コイルの実現を図った。実際に製作された超電導コイルは、内径 219 mm、外径 240 mm のダブルパンケーキコイルで、使用したイットリウム系超電導線材は 52 m というものであった。図 4.3.5 にコイルの外観と併せて応力を支える構造を模式的に示す。

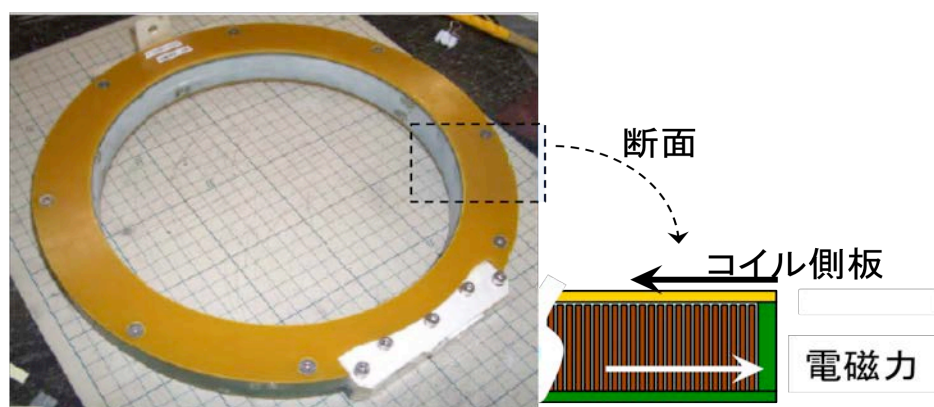


図 4.3.5 試作した Yoroi-coil の外観および耐電磁力構造の模式図

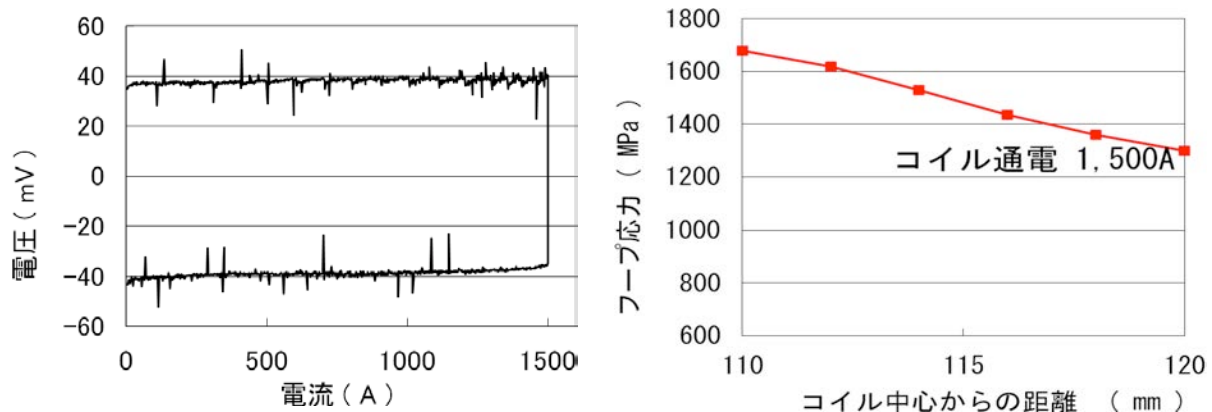


図 4.3.6 Yoroi-coil の通電試験結果 (左) と計算から求めたコイルのフープ応力分布 (右)

Yoroi-coil では、超電導線材に作用する電磁力を超電導線材だけでなく、コイルの面方向の側板で支えることによって、超電導線材の強度の限界を超える電磁力に耐えることを可能にしている。東北大学金属材料研究所強磁場センターで、試作コイルを用いて電磁力により拵がろうとする力（以下、フープ力と記す）に対する体力を検証した。液体ヘリウム中、8 T の外部磁場の下、評価設備の電源限界 1,500 A までコイル通電した結果と、コイルに作用するフープ力の計算結果を図 4.3.6 に示す。コイルには誘導で発生した電圧だけが測定され、抵抗分による電圧発生は認められなかった。イットリウム系超電導線材が超電導特性を維持できる引張強度は 1,000 MPa 程度であるが、コイルに作用するフープ力は計算では最大 1,700 MPa で、イットリウム系超電導線材の引張強度を遙かに超えるという結果であった。金属系超電導コイルの電磁力に対する耐力は 300~400 MPa 程度であり、イットリウム系超電導コイルでも、剥離の問題もあって高強度化は達成できていなかった。この新構造コイルは 2,000 MPa 級の電磁力耐えることが可能で、これまでのコイルの機械強度による制限を変え、大型強磁場コイルでも超電導線材の通電特性を發揮できる構造である。

#### 4.3.4 J-PARC 主リング電源電力補償用 SMES の電源構成

負荷となる加速器用磁界コイルのエネルギーが数 10 MJ で、繰り返し間隔が数秒と短い場合、これまで瞬低対策や電力安定化実証試験などで実績のある磁気エネルギーを貯蔵する電力貯蔵装置 SMES で繰り返しの電力変動を吸収することが可能である。

パルス磁界の電源は磁界を減少させるには磁気エネルギーを減少させるために電力回生を行う必要がある。その回生したエネルギーを電力系統に返さずに再利用することで外部系統に擾乱を起こすことなしに、また、受電電力のピークを大きくすることなしに繰り返し間隔を短くすることができるので経済的にも効果がある。

図 4.3.7 はコンデンサ方式、フライホイール方式、SMES 方式の基本的構成を示している。エネルギー源としてはコンデンサによる静電エネルギー、フライホイールに

よる運動エネルギー，インダクターによる磁気エネルギーがある。負荷が磁界コイルだけに，磁気エネルギーをバッファーとして使う方法は相性が良い可能性がある。または双対的エネルギーである静電エネルギーが良いかもしれない。

## 磁界コイル電源のエネルギー源

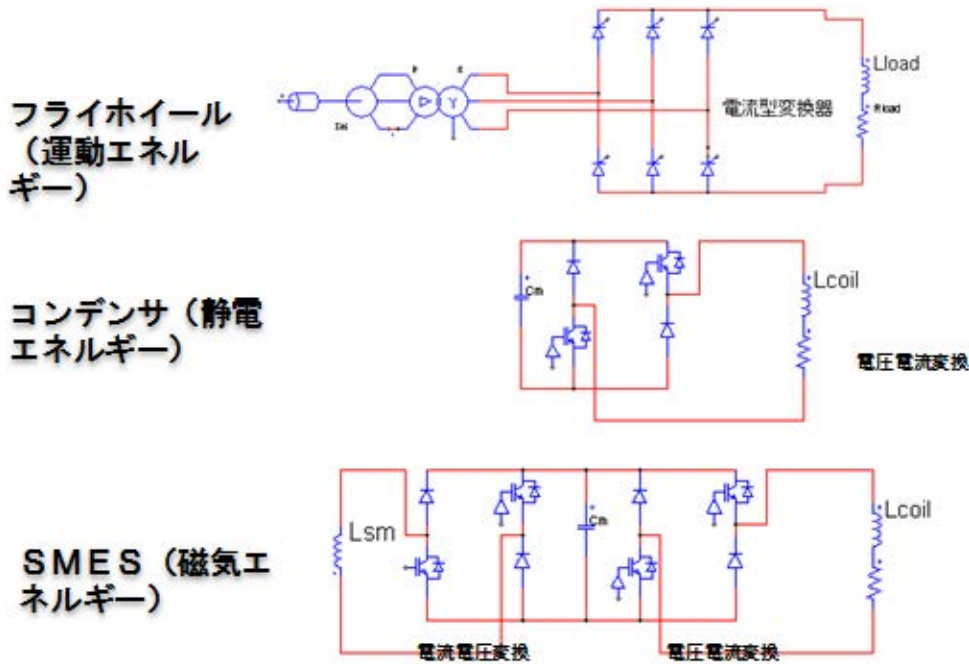


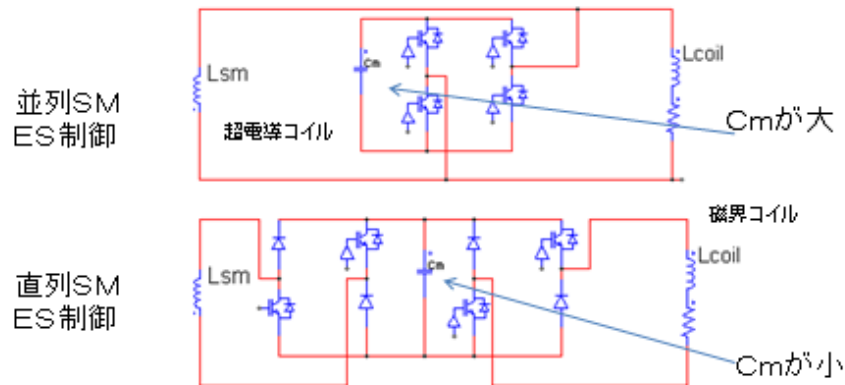
図 4.3.7 エネルギー貯蔵装置の基本構成

フライホイール方式は発電機のもつフライホイール効果のみでエネルギーが十分である。交流と直流の電力変換は実績のあるサイリスタなど高圧大電流の電力変換装置が使える，併せてコイル電流を制御することができる。電流型のサイリスタ変換器だけがコイル負荷の電流を減少させる負電圧を発生できる。制御スピードが数 ms (JT-60 で実証されている) ではあるがコストは最小である。ただ，必要なエネルギーがフライホイールを用いるのには小さすぎて，エネルギーと電力とのバランスがフライホイールシステム向きではない。この中で SMES 案は磁気エネルギーを磁気回路で変換するが，中間に直流電圧を挟んで電流電圧変換チョッパで制御している。直流電圧でなく三相交流を挟んでも可能であることを示した仁田らの先駆的研究がある。

SMES 方式で検討するのは，図 4.3.8 にあるようにコイル電流が逆転しない 1 方向のコイル電流であるから高速チョッパとして還流ダイオードを使った電流型の変換回路である。

## SMES方式

コイル電流制御は電流チョッパ方式  
 エネルギー源としてSMES  
 可逆チョッパ型方式は伊瀬先生の実験がある。



並列方式はコンデンサエネルギーの支援が必要

図 4.3.8 直列 SMES 制御方式と並列 SMES 制御方式の基本構成

$L_{coil}$  は電流の精度を要求されるが  $L_{sm}$  側は電流の精度の要求はないので低速のオンオフスイッチングでよい。その間の差を電圧源コンデンサのエネルギーで調整される。 $L_{sm}$  側は電圧源コンデンサの電圧を所定の範囲内に収めるように、電圧が高くなればスイッチを同時にオンする。 $C_m$  から電流が  $L_{sm}$  へと流れて電圧が低くなる。電圧が低ければスイッチを同時にオフするとコイル  $L_{sm}$  の電流がコンデンサへと流れてコンデンサの電圧が高くなる。どちらか1つのスイッチをオンするとゼロ電圧となってコイル電流の変化は無い。 $L_{coil}$  側は高速にオンオフを繰り返して  $L_{coil}$  電流を指令値に合わせる運転をする。図 4.3.8 に示すように SMES 用超電導コイルの接続方式を直列方式と並列方式で比較すると、 $C_m$  の大きさは直列方式の方が小容量となる。

図 4.3.9 に直列 SMES 方式のシミュレーション回路を示す。このシミュレーションでは簡単なヒステリシス制御を用いている。すなわち指令値と実際値との差がここでは 50 A を越えると最大の正または負の電圧を発生させ、制御偏差を 50 A 以内にする。

図 4.3.10 はシミュレーション波形を示している。シミュレーションの結果、3.2 MJ の超電導コイルがあれば、1.6 H の磁界コイルに 2 kA のコイル電流を供給できることがわかった。コイル電源のチョッパ電力  $W3$  は最大 7.5 MW から -7 MW まで大きく振れるが、入力電力  $W1$  は、数 100 kW の一定になっているのがわかる。電圧源コンデンサは 6 kV まで充電され、エネルギーは 450 kJ の容量で小型である。主たるエネルギーは超電導コイルからの充放電で賄われているのがわかる。

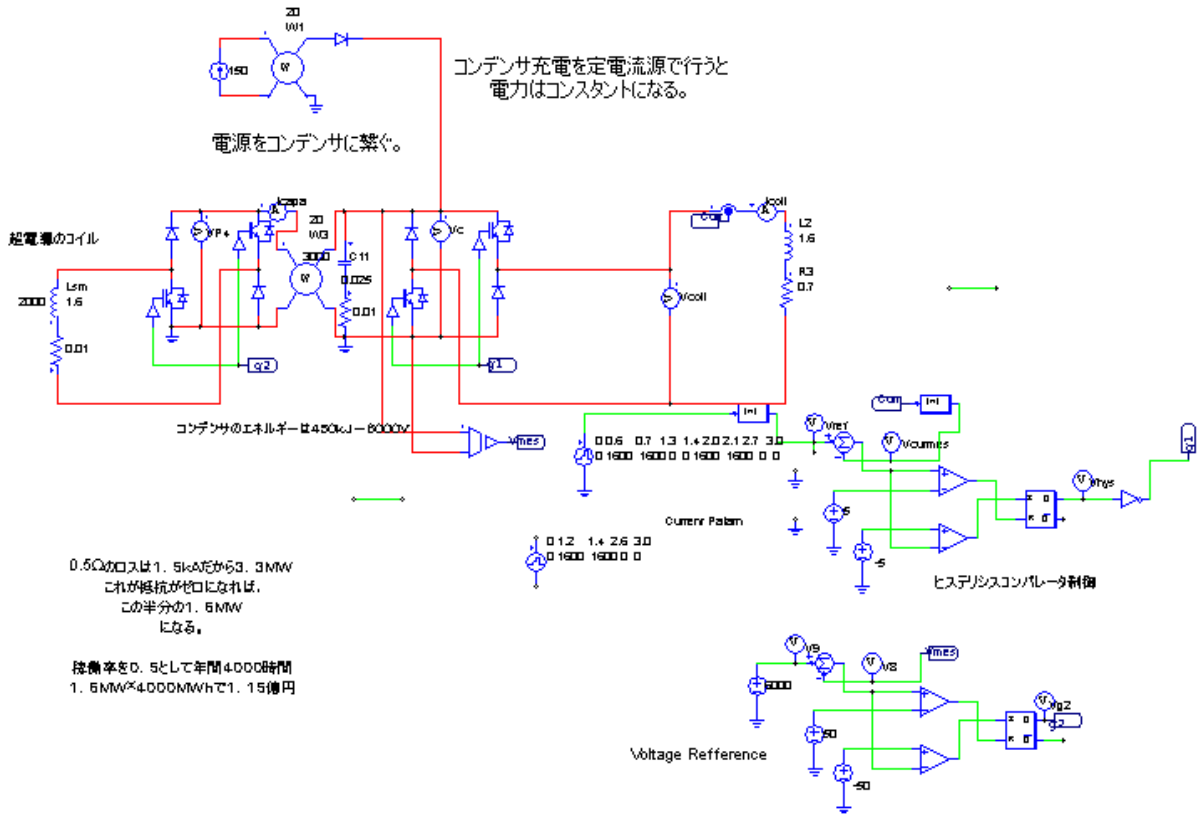


図 4.3.9 直列 SMES 制御方式のシミュレーション回路

## SMES方式のシミュレーション 1.6H-2kAの超電導コイル (3.2MJ)

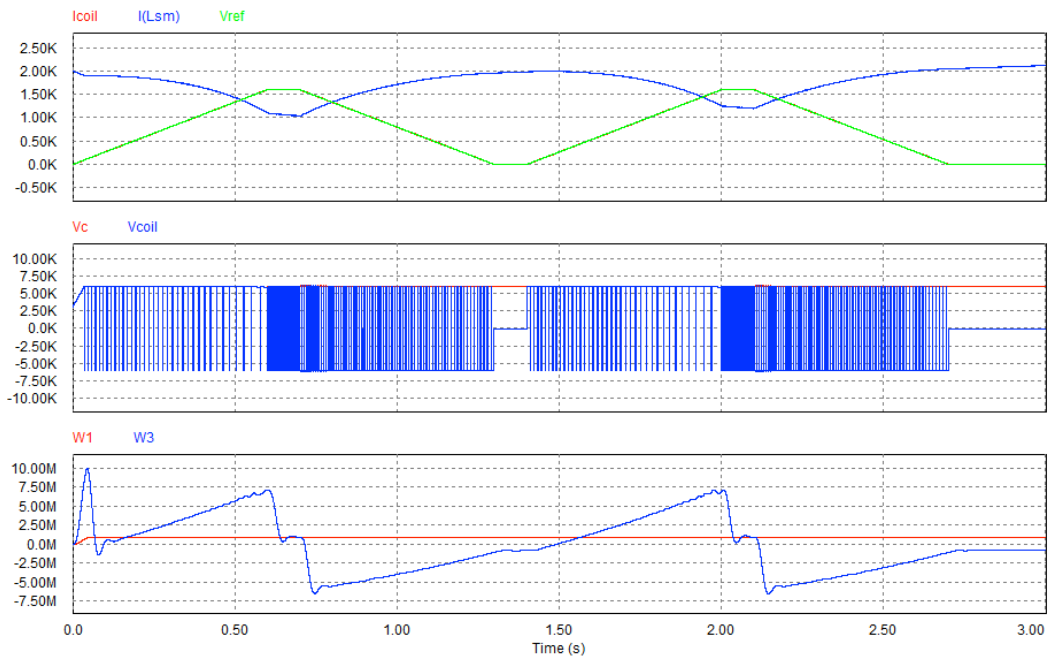


図 4.3.10 直列 SMES 制御方式のシミュレーション結果

#### 4.3.5 国家プロジェクト実証試験結果に基づく SMES の適用性

4.3.3 節で述べた SMES 開発動向において、細尾発電所で実施された電力系統制御用 SMES の実証試験結果に基づき、SMES の J-PARC 主リング電源電力補償用途としての適用性について検討する。

細尾発電所の実証試験では、図 4.3.11 に示すように、実用化 100 MVA-SMES 変換器の 1 段分に相当する変換器を抽出し試験を行った。図 4.3.4 に、実際に製作した 10MVA/20MJ 級 SMES の機器配置を示す。表 4.3.2 および図 4.3.12 に、主な機器仕様と超電導コイルの入出力仕様を示す。図 4.3.13 に SMES を接続した系統を示す。11 kV 母線に SMES は接続しており、変動負荷の工場の負荷変動に応じて SMES はそれを補償するよう動作し、SMES が補償した状況は、上流系統と接続する 11/66 kV の変圧器 3 台の負荷状況で判る。図 4.3.14 に SMES の周波数応答特性を示す。図 4.3.15 に負荷変動補償制御ブロックを示す。変動負荷  $P_{load}$  (有効電力負荷)、 $Q_{load}$  (無効電力負荷) に応じて、SMES 有効電力指令  $P_{smes}$ 、SMES 無効電力指令  $Q_{smes}$  を出力する。P (有効電力) は SMES に蓄えられたエネルギーを放出またはエネルギーを SMES に吸収することで補償し、Q (無効電力) は変換器の位相制御により補償する。図 4.3.16 に SMES による負荷変動 (有効電力) 補償の状況を示す。変動負荷を補償するように SMES を制御し、変圧器 (補償後) の変動は小さくなる。また、SMES 出力が放出のときに SMES コイル電流の値は小さくなり、SMES 出力が吸収のときに SMES コイル電流が大きくなるのを示す。図 4.3.17 には変動負荷と上流系統と接続する 11/66 kV の変圧器 3 台の負荷状況の差を示す。SMES の補償により変圧器の負荷電力が変動負荷より小さくなったことを示す。図 4.3.18 に制御ブロック変動負荷の変動分検出の  $T_1$  の違いによる補償効果の差を示す。 $T_1 = 20$  では変動負荷の全域にわたり SMES が補償し、変動の振幅が小さくなった。また、 $T_1 = 1$  では変動負荷の変動の初期のみを補償している状況となった。図 4.3.19 に SMES の P、Q を同時に補償した場合の状況 (PQ 補償あり) の効果を SMES 補償なし (PQ 補償なし) と比較した状況を示す。発電機は力率一定制御で制御されている。P に加えて Q の補償制御を行っても P 制御に影響を与えず、変動負荷 Q を補償するように SMES が Q 補償制御し、その残りを発電機が補償している状況を示す。SMES の Q 補償制御により、発電機 Q 出力の変動が小さくなり、また、発電機の Q 制御に関わる要素である界磁電圧、界磁電流が小さくなり、SMES により発電機の制御負担が軽減したことを示す。

試験結果をまとめると下記のようなになる。

##### (1) 有効電力制御

SMES の有効電力の入出力により変動負荷の変動が軽減されていることを、上位系統との連系点にて確認した。

##### (2) 無効電力制御

SMES の無効電力の入出力により、発電機の無効電力制御が軽減されていることを確認した。同様に発電機界磁電流、界磁電圧の低下を確認した。

(3) 有効・無効電力同時制御

有効、無効電力の入出力を同時に制御可能な SMES の特性を確認した。

(4) 負荷変動補償動作回数

確認回数 51,391 回 (200 kW の入出力を 1 回)

保護動作, 制御, 運転を通し, システムとしての完成度や信頼性の高さを確認した。

(5) 高速応答性検証

SMES は数 Hz までの高速追従性を確認した。

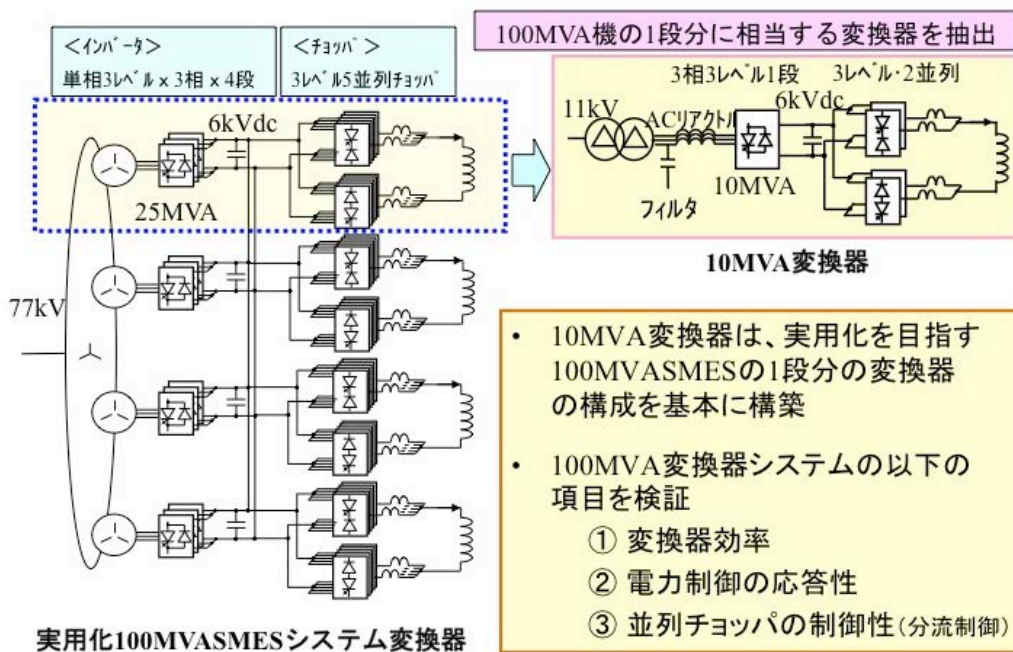


図 4.3.11 変換器試験の考え方

実系統に連系し、2万回以上の入出力性能を検証できること

モデル入出力パターン：1MW × 10秒 × 連続運転

変換器定格：10 MVA

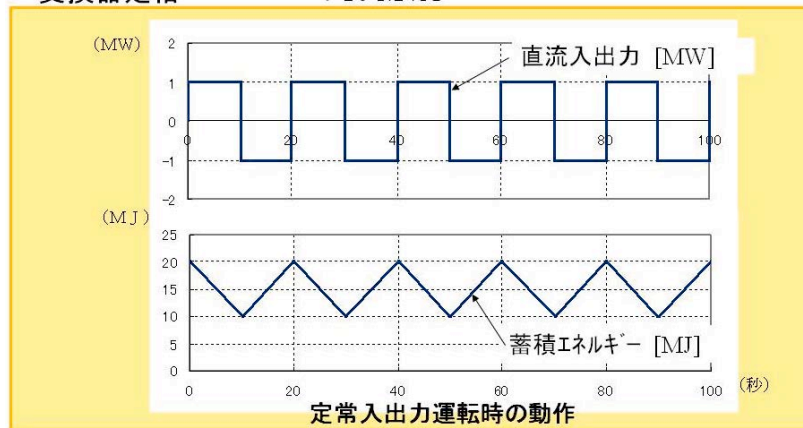


図 4.3.12 超電導コイルの入出力仕様

表 4.3.2 主な機器の仕様

超電導コイル

項目	諸元
運転条件	1MM出力運転
超電導コイルインダクタンス	21.1 H
最大蓄積エネルギー	19.2 MJ
利用エネルギー	10 MJ
定格直流電流	1,350 A
最小直流電流	930 A
通常運転時最大印加電圧	3 kV
定格電流遮断時印加電圧	6 kV
主回路接地方式	コイル中点接地
遮断時定数	5 秒

電力変換装置

項目	インバータ諸元	チョップ諸元
装置定格容量	10 MVA	20 MVA
適用素子	GCT	GCT
適用素子電圧	6 kV	6 kV
適用素子電流	6 kA	6 kA
変換器構成	1段3相インバータ	2並列チョップ回路
アーム構成	3レベル構成	3レベル構成
冷却方式	純水冷却	純水冷却

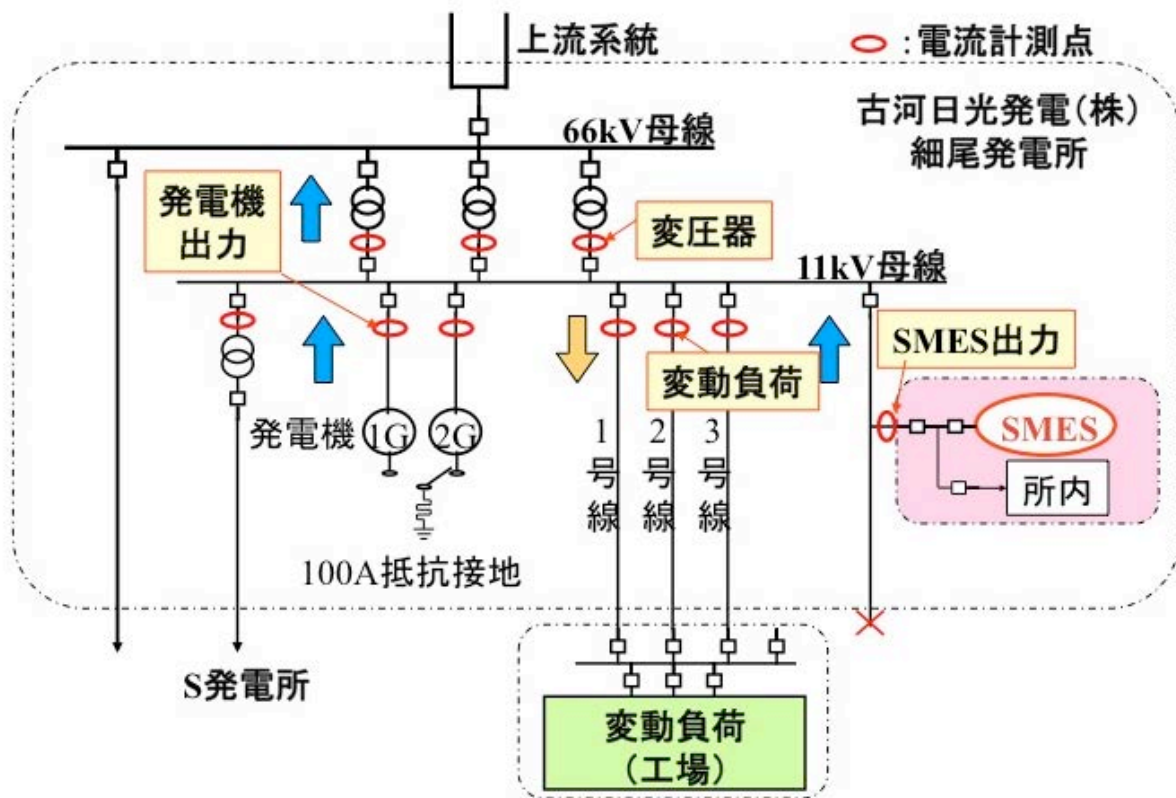


図 4.3.13 SMES の接続系統図



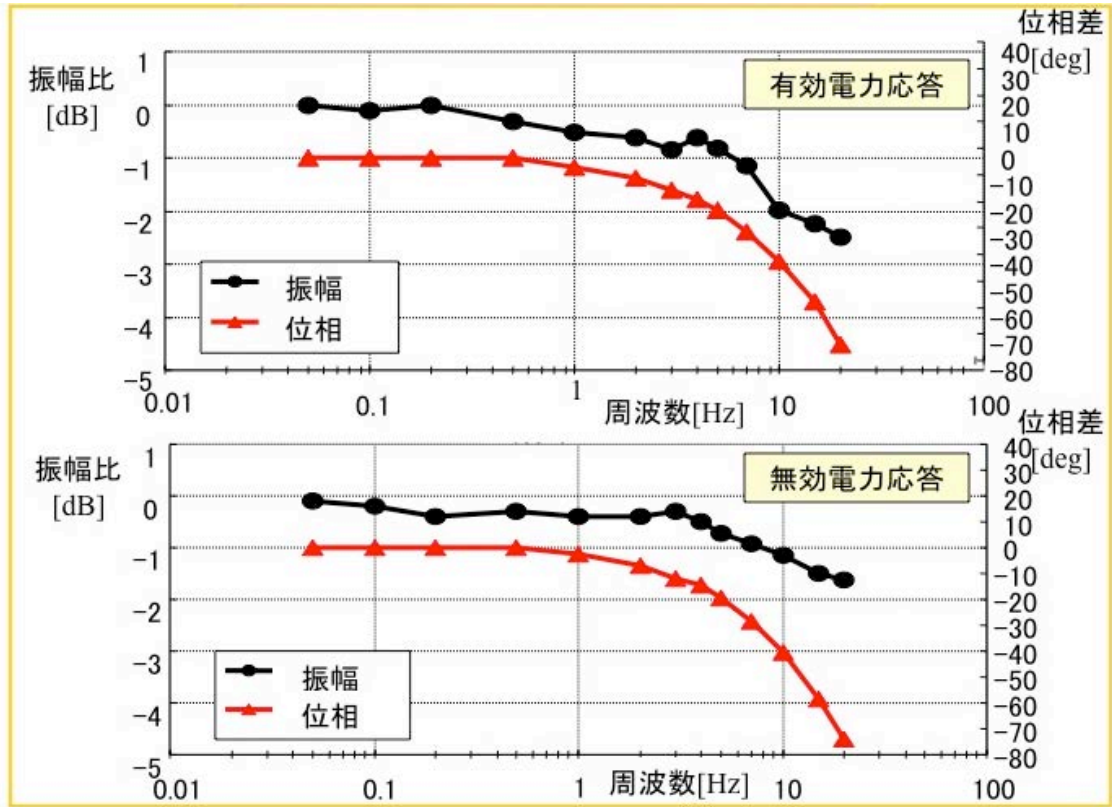


図 4.3.14 SMES の周波数応答特性

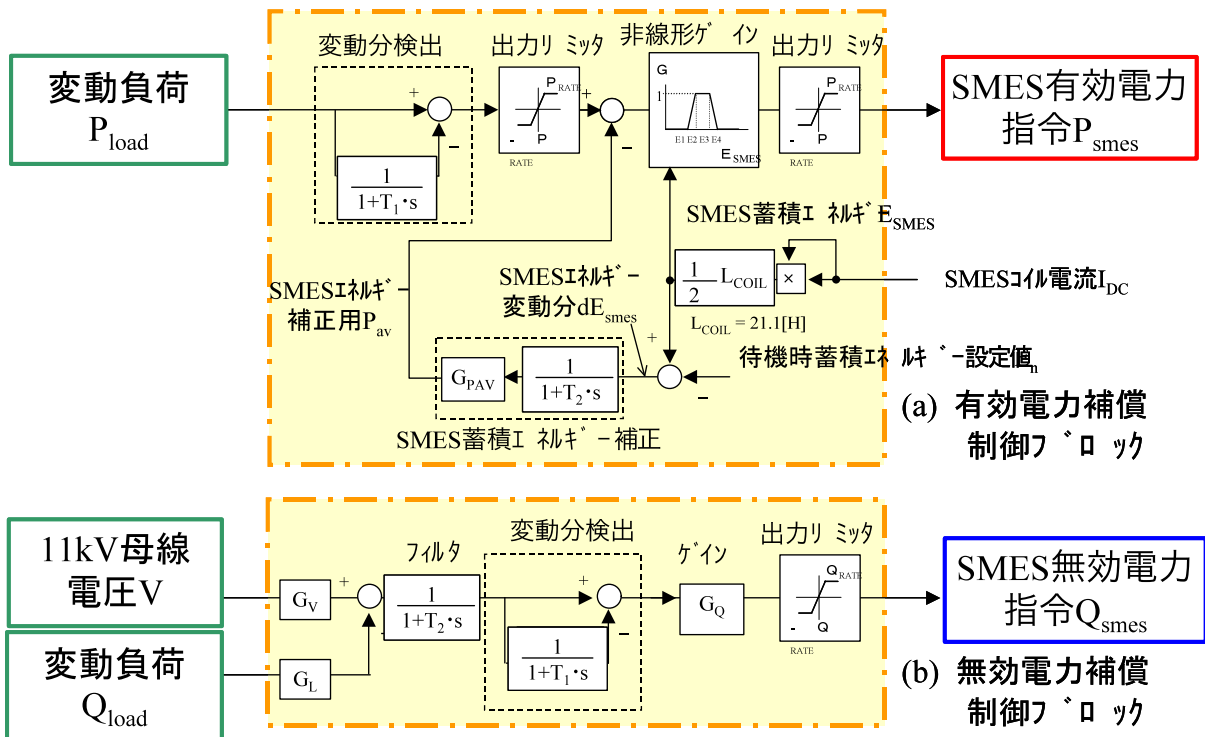


図 4.3.15 負荷変動補償制御ブロック

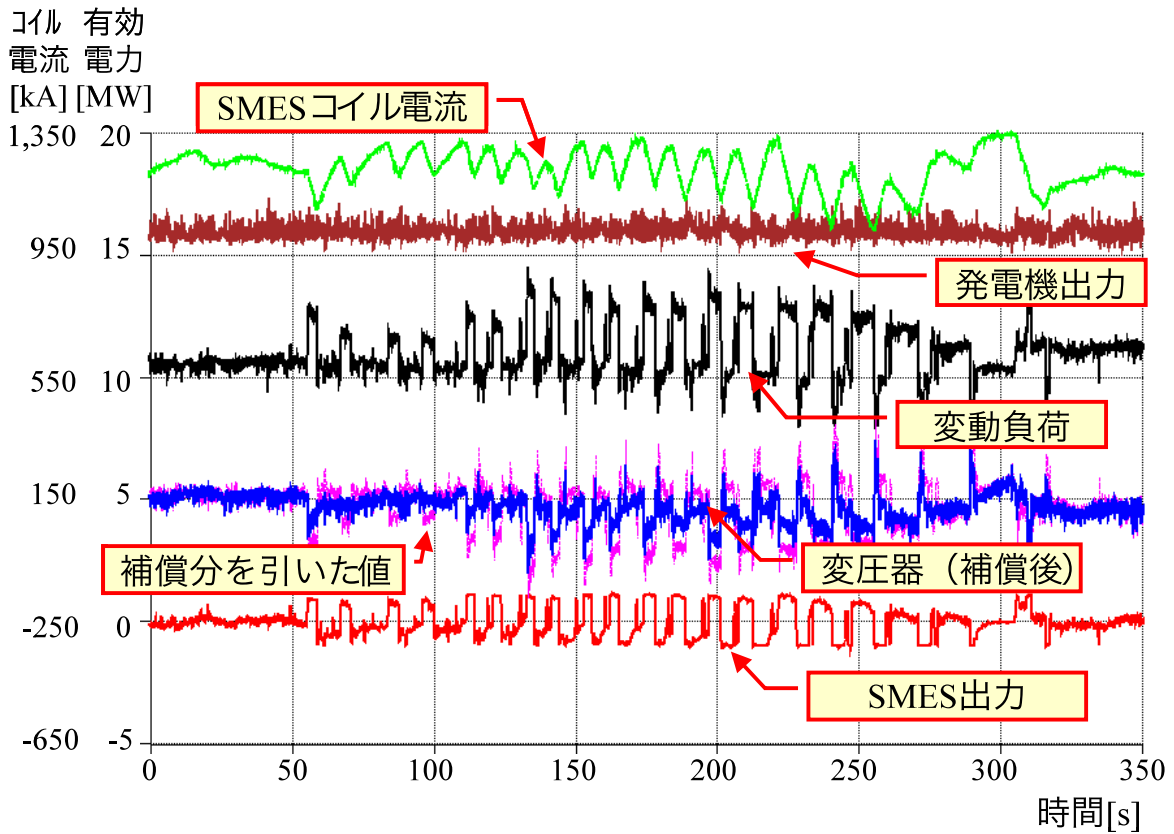


図 4.3.16 SMES による負荷変動補償状況

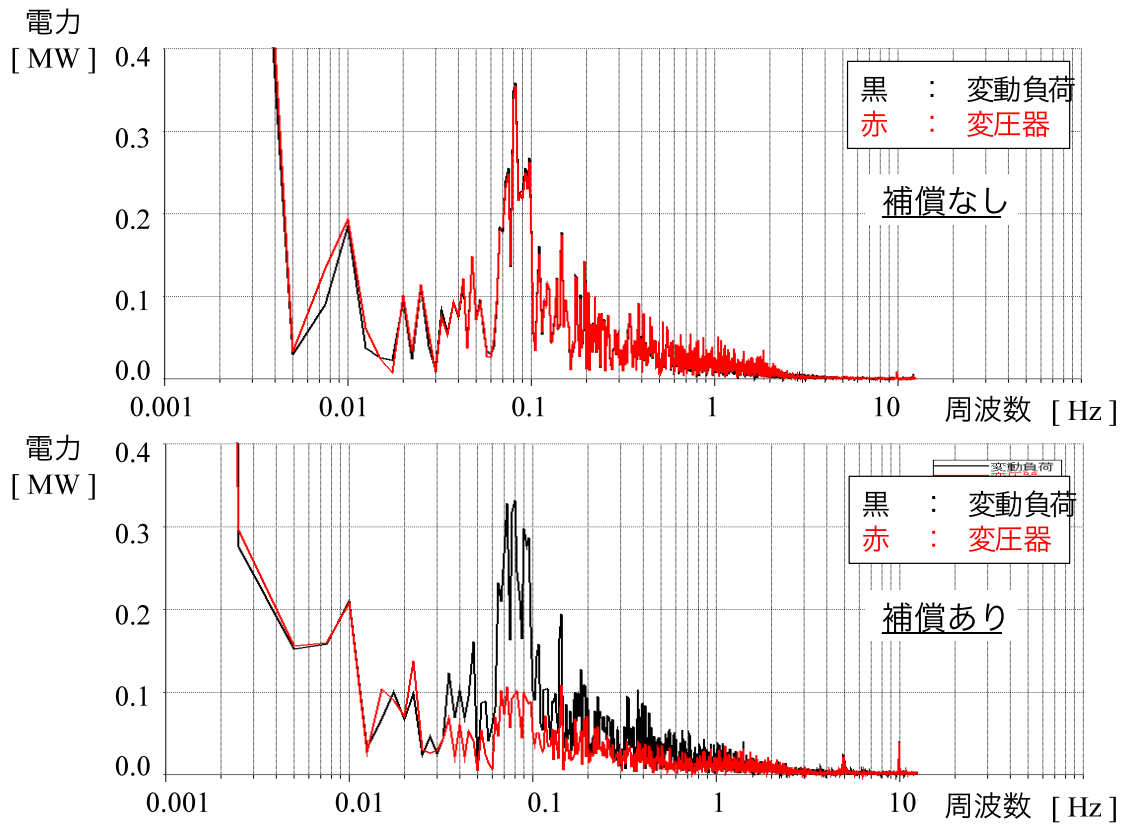


図 4.3.17 SMES による補償有無の差

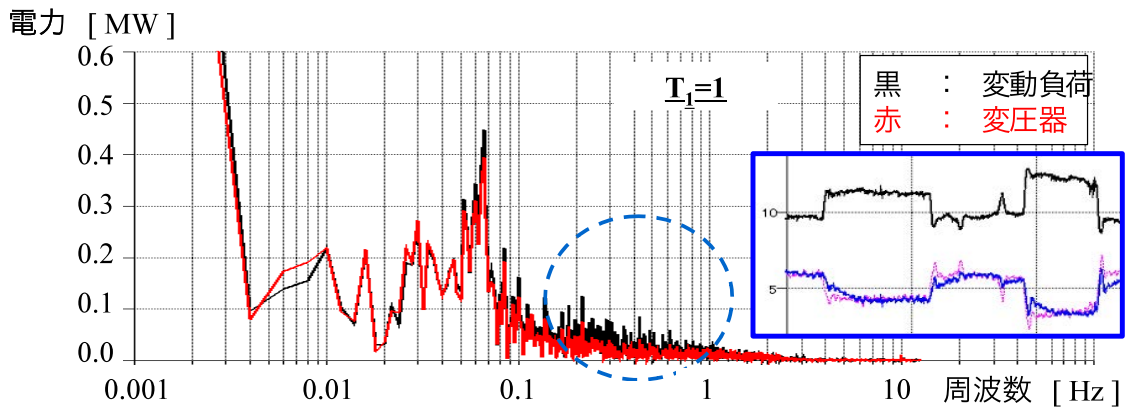
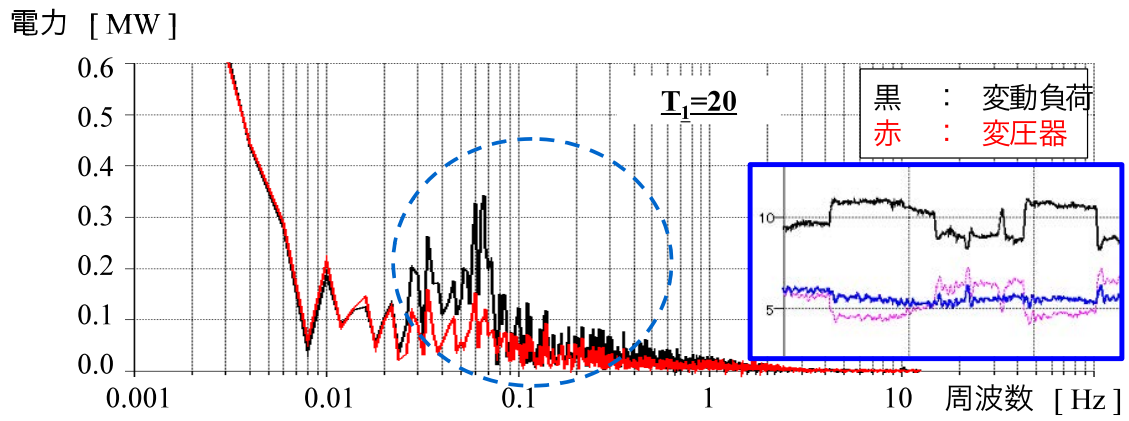


図 4.3.18 制御ブロックの変動分検出  $T_1$  の違いによる制御の差

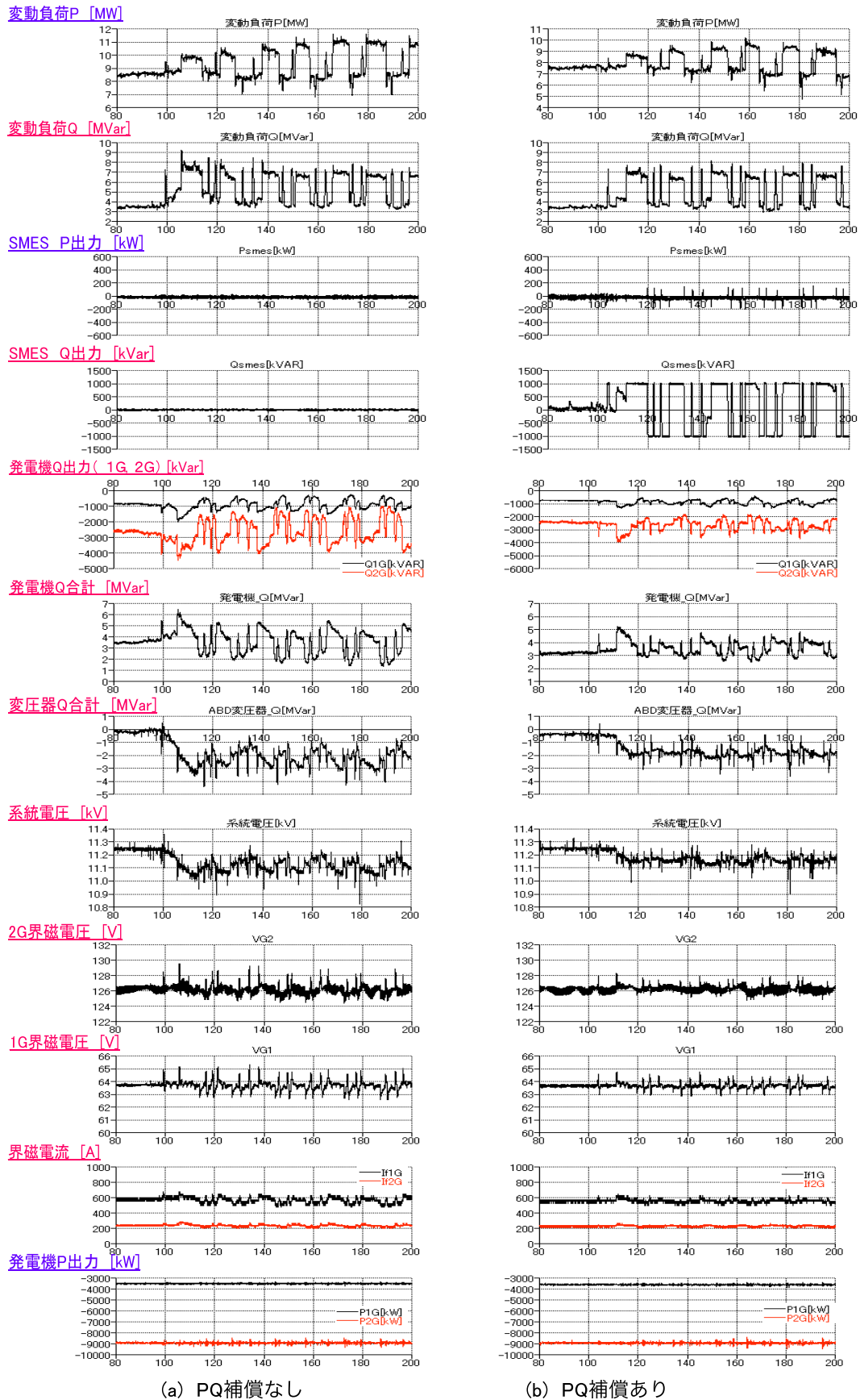


図 4.3.19 SMES による負荷変動補償制御有無の差

NbTi 超電導線を用いた SMES については、国家プロジェクトにおいて実系統連系試験が平成 19 年度に実施された。この試験では、接続する系統の制約から、入出力が 1 MW に制限されたものの、プロジェクトの目標は出力 100 MVA 級であったため、製作された変換器はこのクラスを想定するものであった。結果から、SMES は数 Hz までの高速応答性があることが実証されるとともに、懸念された繰り返し充放電に伴う交流損失発生による温度上昇も見られず、良好な制御性が確認されている。変換器においても、100 MVA 変換器システムとしての並列チョッパ回路の制御性も確認されている。

以上のことから、最大で 1 秒間に 70 MVA の電力出し入れの可能性がある J-PARC 主リング電源電力補償用に SMES を適用することは、技術的には見通しが立っていると判断できる。

着実な低コスト化への取り組みを展開してきたこれまでの SMES 開発国家プロジェクトの研究成果を図 4.3.20 にまとめる。

## これまでの SMES 開発プロジェクト

### 着実な低コスト化への取り組みの展開



**フェーズ IV** Y系超電導コイルによる高磁場コンパクト化で、  
更なる低コスト化と信頼性向上を図る

図 4.3.20 SMES 開発国家プロジェクトの研究成果のまとめ

#### 4.3.6 高温超電導線材を用いた SMES 用コイルの電磁力低減化と概略計算

##### (a) 高温超電導 SMES の必要性と超電導コイルの課題

近年のヘリウムが入手困難な状況を鑑みて SMES 方式の開発案として高温超電導線材を用いた場合の可能性を検討する。高温超電導線材の利用が可能であれば、超電導コイルの冷媒として液体ヘリウムを利用する必要がなく、冷却温度の選択に自由度が増すため冷凍動力の大幅削減が期待できる。

使用する高温超電導線材は、高磁界領域でも優れた臨界電流（超電導状態が維持される最大電流）特性を有し、電力応用の最有力候補として期待されているイットリウム系（以下、YBCO）線材の利用を考える。SMES の貯蔵エネルギーは、最大発生磁束密度の 2 乗に比例することから、YBCO 線材を使用することにより超電導コイルの高磁界化が実現できれば、SMES 用超電導コイルの小型化が可能となる。

しかしながら、高磁界化に伴い超電導コイルに強大な電磁力が発生する。このことは、コイル巻線に応力限界による制約が加わり余分な電磁力支持材を必要とし、高磁界領域で大電流密度特性を有する YBCO 線材の本来の特性を十分に活用できなくなることを意味する。特に、高繰り返しの連続充放電動作が要求される J-PARC 主リング電源の電力補償用途の SMES では、超電導コイルに発生する電磁力の大幅な低減化が要求されることになる。この解決策として、コイルの巻線形状を最適化し、ドーナツ型の巻枠に YBCO 線材を斜めに巻いていくヘリカル巻線形状の電磁力平衡コイルの可能性を検討する。

##### (b) SMES 用コイル巻線形状の最適化

電線をコイル状に巻くと電線の周りにできる磁界に圧力差（磁界の疎密の差）ができるために電磁力が発生する。したがって、超電導コイルによって磁気エネルギーを貯めるためには、磁界の圧力差（電磁力）で生じる引張応力に耐えるだけの圧力容器（電磁力支持材）が必要になる。ここで重要なことは、圧縮応力はエネルギー貯蔵に関与しない無駄な発生応力であるということである。

図 4.3.21 は、SMES 用超電導コイルとして多く研究されているソレノイドやトロイダル磁界コイルについて、電磁力と発生応力の関係を示している。ここでは、コイル表面に厚みの無い表面電流が連続的に流れているものとして考える。

4.3.3 節で述べた国家プロジェクトの金属系 SMES の超電導コイル形状はマルチポールソレノイドコイルが採用されている。マルチポールを構成している各ソレノイドは、全空間に磁界を発生することから、所定のエネルギーを貯めるために必要な超電導線の物量を最も少なくできる。しかしながら、コイル軸方向に圧縮応力が生じ、コイル半径を広げようとする電磁力（フープ力）によってトロイダル方向（円周方向）に引張応力が集中する。

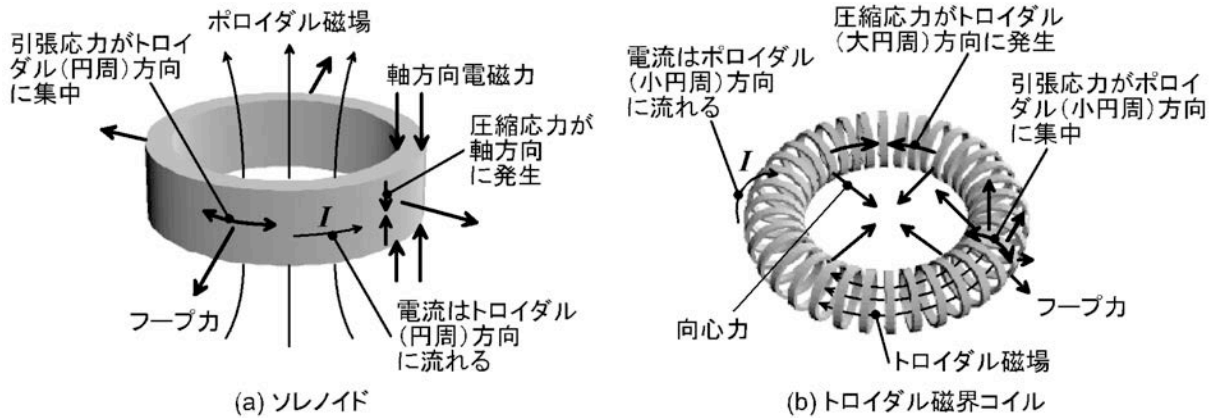


図 4.3.21 ソレノイド(a)とトロイダル磁界コイル(b)の電磁力と発生応力

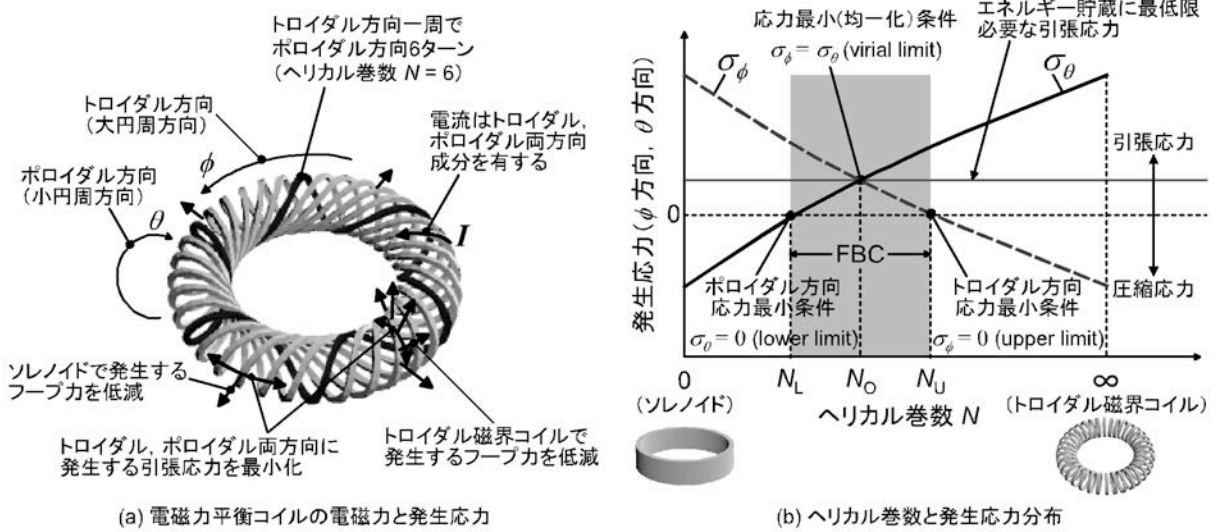


図 4.3.22 電磁力平衡コイルの外観と発生応力分布

一方、酸化物系 SMES 用コイルとして要素技術開発が進められているトロイダル磁界コイルは、複数のソレノイドをドーナツ状に並べたコイルであり、磁界はドーナツ内部だけに発生する。そのため、エネルギー貯蔵に必要な超電導線の物量が最も多くなる。各ソレノイドには互いに中心に集まろうとする電磁力（向心力）が働き、この力を支えるために巻枠のトロイダル方向（大円周方向）に圧縮応力が発生する。したがって、各ソレノイドのフープ力によって引張応力がポロイダル方向（小円周方向）に集中する。

電磁力平衡コイル（FBC: force-balanced coil）は、図 4.3.22 に示すように、ヘリカル巻線形状のドーナツ型コイルであり、ソレノイドとトロイダル磁界コイルとのハイブリッド型コイルである。図 4.3.22-(a)のコイルは、ヘリカル巻数が 6 ターンの電磁力平衡コイルであり、トロイダル方向（大円周方向）に一周する間にポロイダル方向（小円周方向）に 6 ターンとなる複数のヘリカル巻線から構成された電磁力平衡コイルを示している。

図 4.3.22-(b)は、ヘリカル巻数  $N$  と発生応力分布との関係を示した模式図である。図 4.3.22-(b)において、ソレノイドは等価的にヘリカル巻数  $N=0$  の状態、トロイダル磁界コイルは  $N=\infty$  の状態となる。電磁力平衡コイルは、最適なヘリカル巻数を選定することで、ソレノイドやトロイダル磁界コイルで発生する電磁力を互いに打ち消しあい、圧縮応力を発生させずに引張応力の最小化が実現できる。すなわち、電磁力平衡コイルとはヘリカル巻数をポロイダル方向応力が最小となる  $N_L$  とトロイダル方向応力が最小となる  $N_U$  との間で選定したヘリカルコイルである。特にヘリカル巻数を  $N_0$  に選定した場合、引張応力はエネルギーを貯めるために最低限必要な大きさまで最小化され、電磁力支持材の必要量をソレノイドの 1/2 以下に、トロイダル磁界コイルの 1/4 にまで低減できる。最適なヘリカル巻数  $N_0$  は式 (1) のようにアスペクト比  $\alpha$  (=コイル大半径/コイル小半径) の関数で決定される。

$$N_0 = \left( \frac{\alpha(\ln 8\alpha)(\sqrt{\alpha^2 - 1} - \alpha)}{\alpha^2 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

図 4.3.23 に電磁力平衡コイルのヘリカル巻数とアスペクト比との関係を示す。なお、電磁力平衡コイルは、所定のエネルギーを貯めるために必要な超電導線の物量をトロイダル磁界コイルよりも低減できるが、ソレノイドよりも少なくとも 1.6 倍以上は必要となる。

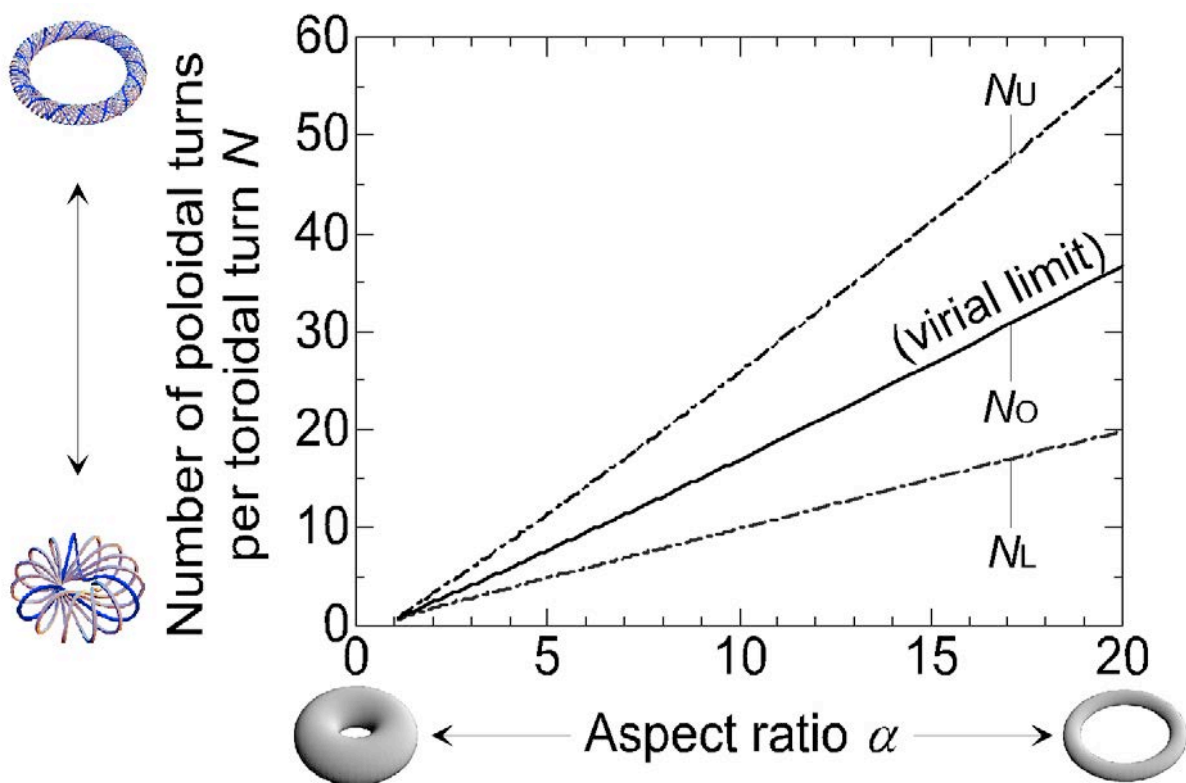


図 4.3.23 電磁力平衡コイルのヘリカル巻数



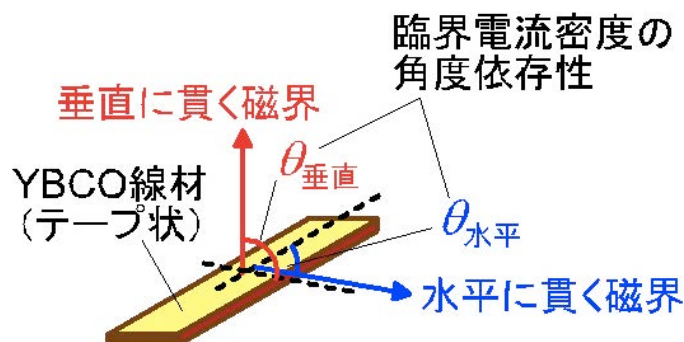


図 4.3.24 YBCO 線材に印加される磁界

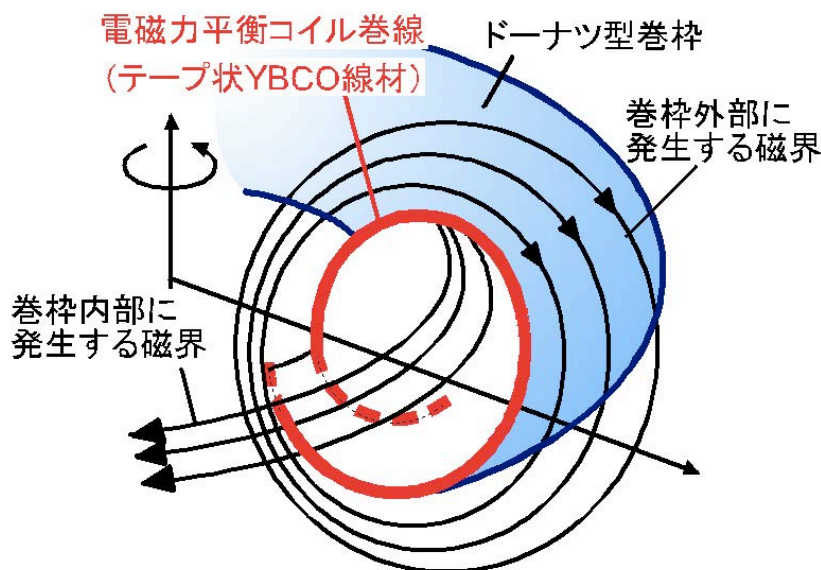


図 4.3.25 電磁力平衡コイルが発生する磁界

加えてテープ形状の YBCO 線材の場合，図 4.3.24 に示すようにテープ面を貫く垂直磁界が印加された場合，臨界電流値が大幅に低下する。ソレノイドの場合，コイル巻線間の漏れ磁界やコイル端部で磁力線が曲がる影響でテープ面を貫く磁界が発生し，超電導コイルの臨界電流特性を低下させる要因となる。このため，国家プロジェクトの酸化物系 SMES ではトロイダル磁界コイルの可能性について研究されているが，上述のように電磁力による制約が生じる。

これに対して電磁力平衡コイルは，図 4.3.25 に示すように，ドーナツ内部だけでなく，外部にも磁界を発生させるコイルであるが，ヘリカル巻線ピッチを制御することで従来のトロイダル磁界コイルと同様に YBCO 線材のテープ面を貫く垂直磁界を大幅に低減できるコイルとなる。加えて，電磁力平衡コイルは，電流方向に対して水平方向の磁界が斜めに交わるため，電磁力を大幅に低減できることだけでなく，トロイダル磁界コイルに比べて臨界電流密度の磁界に対する角度依存性が緩和される可能性がある。

(c) 電磁力平衡コイルを用いた主リング電源電力補償用 SMES の概略計算

4.3.4 節で述べた直列 SMES 制御方式の検討結果に基づき、電磁力平衡コイルを用いた高温超電導 SMES の概略計算を行う。図 4.3.10 で得られたシミュレーション結果より、主リングコイル 1 台分の電力補償で要求される SMES の基本仕様は、貯蔵容量 3.2 MJ、自己インダクタンス 1.6 H、定格電流値 2 kA となる。このとき、一回の充放電動作で、コイル電流値は 2 kA から 1 kA の範囲で変化する。すなわち SMES の充放電率は 75% であり、最大貯蔵容量 3.2 MJ のうち 2.4 MJ を電力変動補償に利用する。

現在、市販されている YBCO 線材は、10 mm 幅のテープ形状の線材で、100 mm 厚の金属基板（ハステロイ）上に超電導材を結晶成長させて作られている。臨界電流値は 77 K、0 T で 500 A 程度である。この特性から、SMES 応用で使用される特性を、50 K、10 T で 1000 A、20 K、10 T で 2500 A は得られるものとする。この場合、SMES の運転温度を 50 K とすれば市販のテープ線材を 3 枚積層導体とすることで 2 kA の導体が形成でき、20 K とすれば 1 枚ないし 2 枚の積層導体で 2 kA の導体が形成される。

主リングコイル 1 台分の電力補償で使用される 3.2 MJ の電磁力平衡コイルは、図 4.3.26 のように外直径 1 m、高さ 0.2 m 程度のコイルとなり、最大発生磁束密度は 9 T である。コイル巻線は、ヘリカル巻数 6 ターン × 5 組 × 252 ターン = 総巻数 7560 ターンのコイルとなる。

YBCO 線材の総延長は、3.2 MJ のコイル 1 基あたり、50 K の設計で 3 枚積層導体では 5 km × 3 並列 = 15 km、20 K の設計で 2 枚積層導体では 5 km × 2 並列 = 10 km となる。ただし、一続きのヘリカル巻線は約 1 km であるため、現状の YBCO 線材でも十分製作の可能性は期待できるものである。（線材メーカーによると連続 800 m の開発実績があると報告されている。）

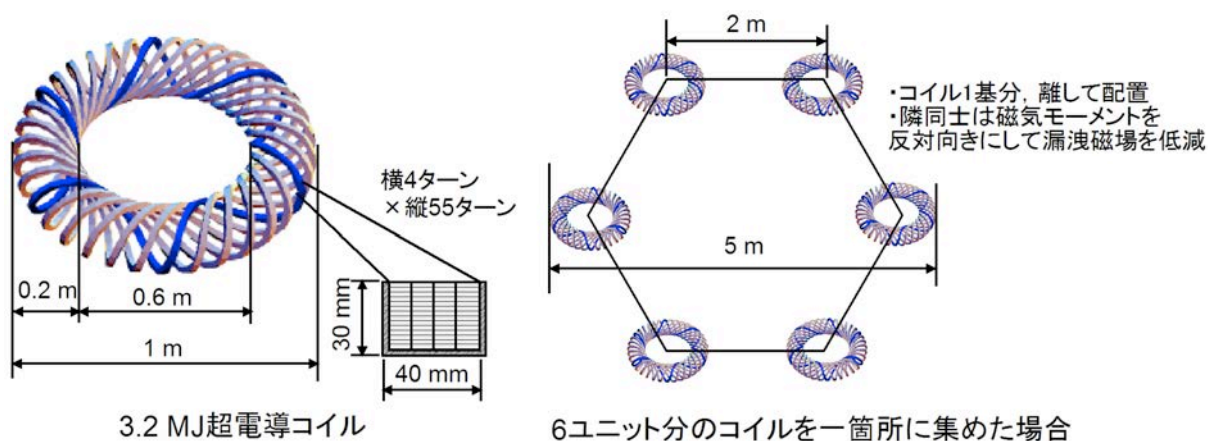


図 4.3.26 3.2 MJ-9 T 級電磁力平衡コイルのイメージ（図は 6 組のヘリカル巻線で構成されたコイルだが設計では 5 組のヘリカル巻線で構成される。）

コイルに発生する電磁力は、YBCO 導体自体の引張応力で支持するものとする。このとき、YBCO 線材の金属基板（ハステロイ）に発生する最大応力は 50 K の 3 層積層導体で 107 MPa、20 K の 2 枚積層導体で 160 MPa と見積もられ、YBCO 線材が有する金属基板自体で電磁力支持は可能であると思われる。

主リングコイル 6 台分の電力補償を行うための SMES 用超電導コイルをすべて一か所に配置した場合、図 4.3.26 のように 10 m × 10 m の範囲で設置することは可能であると思われる。ただし、コイル同士をさらに近付けて配置することも可能であるため、漏洩磁界を考慮した設置面積はさらに低減できるものと期待できる。

## 4.4 電気二重層キャパシタ (EDLC)

### 4.4.1 特徴

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。電気二重層とは、固体電極と電解質溶液が接触する界面において分子レベルで薄い膜が生じ、その膜によって極めて短い距離を隔てて正・負の電荷が対応して配列した状態をいい、正負一組の活性炭等の表面積の大きい電極を電解液に浸して充電を進めると電極と電解液との間に分極を生じて大きな静電容量を得ることができる。EDLC は、この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。

近年、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、二次電池補助用蓄電デバイスとしてのハイブリッド自動車および電気自動車への搭載をはじめ、12 MVA × 1 秒の瞬時電圧低下補償装置における蓄電デバイスとしての電力用途への適用など、その適用範囲が広がりつつある。また、SMES と比較しても基本的に冷却が不要でメンテナンスフリーであり（ただし、必要に応じて強制風冷設備、空調設備などが設けられることもある）、取り扱いも容易であるため、屋内および屋外の設置も短期間で可能である。EDLC はこうした優れた特徴をもつため、今後も蓄電デバイスとして種々の分野で更なる活躍が期待されている。

### 4.4.2 回路構成

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、ここ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する。ただし、これより述べる内容は先に J-PARC で計画されていた 50 GeV 運転の検討条件に基づいたものである。したがって、Bending Magnet の電流最大指令値は 3015 A であり、励磁周期は 3.64 秒として検討を行っている。しかし、本報告書で検討する 30 GeV、励磁周期 1 秒という運転条件においても、基本的に回路構成・制御方法は変わらず、EDLC や電力変換器の容量等を変更することによって十分に対応できると考えられる。

#### (a) 回路構成と制御構成

提案する直流側補償のシステムの回路構成について図 4.4.1 に示す。現在の J-PARC 電源の回路（電流形交直変換器+コイル）の直流側（コイル側）に EDLC を 2 台のチョッパと直流リンクキャパシタを介して接続する構成である（他に EDLC の初期充電用に別回路が必要になる可能性がある）。図 4.4.2 は、図 4.4.1 の回路を対称性にしたがって 6 等分した一つ（1 ユニット）を表したものであり、図 4.4.1 の破線部が図 4.4.2 に相当する。EDLC の充放電は、負荷側（コイル側）に接続されたチョッパで制御され、負荷電流は電流形交直変換器によって制御される構成である。

図 4.4.3 に 1 ユニット分の詳細な回路構成を、図 4.4.4 にその制御構成をそれぞれ示す。図中の各回路パラメータは 50 GeV 運転の条件にしたがって設計されている。

Bending Magnet 電流の高精度な制御を可能とするために、直流側に Passive Filter および Hybrid Filter が接続されている。Hybrid Filter は半導体スイッチング素子 IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) の適用を想定したフィルタで、電流リップルを低減し要求されるトラッキングエラー条件を満たすために設けられているが、30 GeV 運転では必要としない可能性もある。

Chopper 1 は、予め運転パターンより計算された電圧指令値にしたがって電流形交直変換器と同期して電圧を発生する。この Chopper 1 の動作によって EDLC は充放電されることになる。この場合、コイル電流の制御性については Chopper 1 のスイッチング周波数が十分高ければ良好であると考えられる。一方、Chopper 2 は直流リンク電圧を 3 kV 一定に維持する運転を行う。

この回路構成において EDLC の代わりに SMES を用いる場合には、図 4.4.3 の Chopper 2 の回路を電流形に対応したものに変更すれば良く、他の回路構成を変えることなく対応できる。

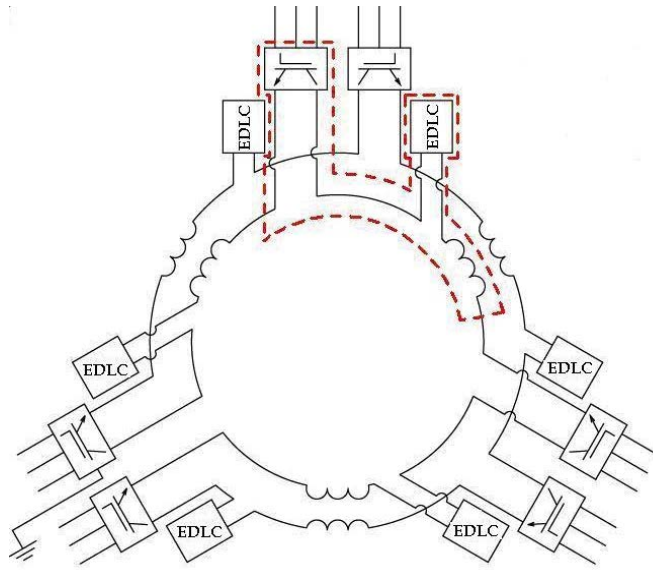


図 4.4.1 EDLC による電力補償を直流側で行う場合の全体の回路構成

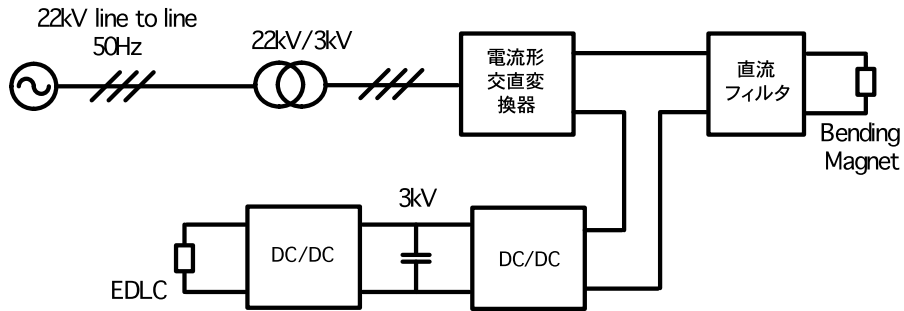


図 4.4.2 EDLC を用いた電力補償装置 1 ユニット分の回路構成

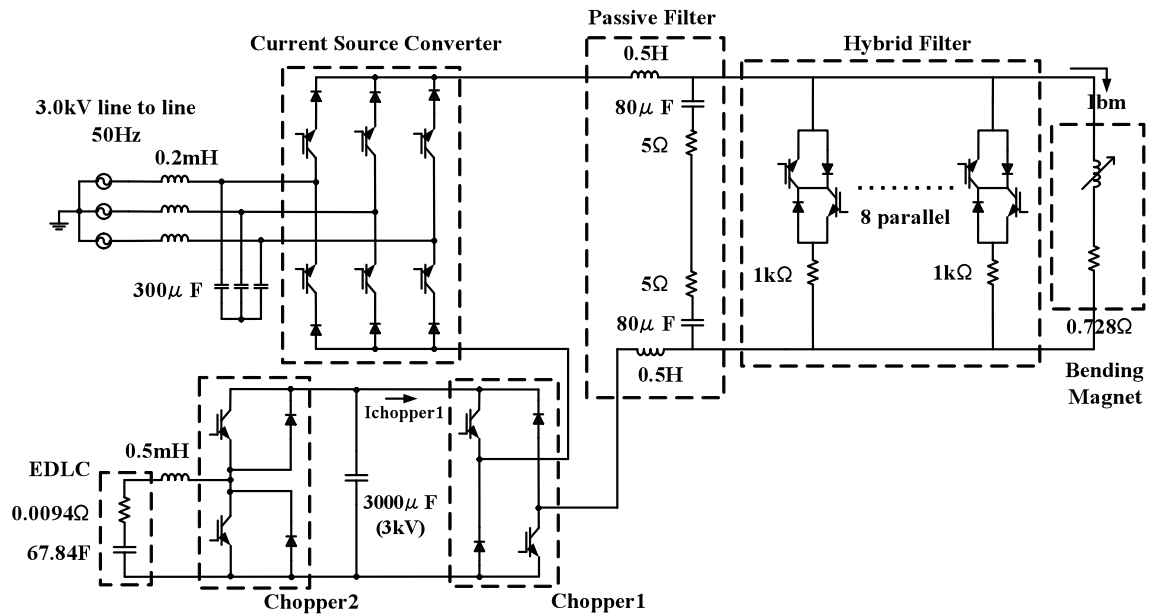


図 4.4.3 EDLC を用いた電力補償装置 1 ユニット分の詳細な回路構成

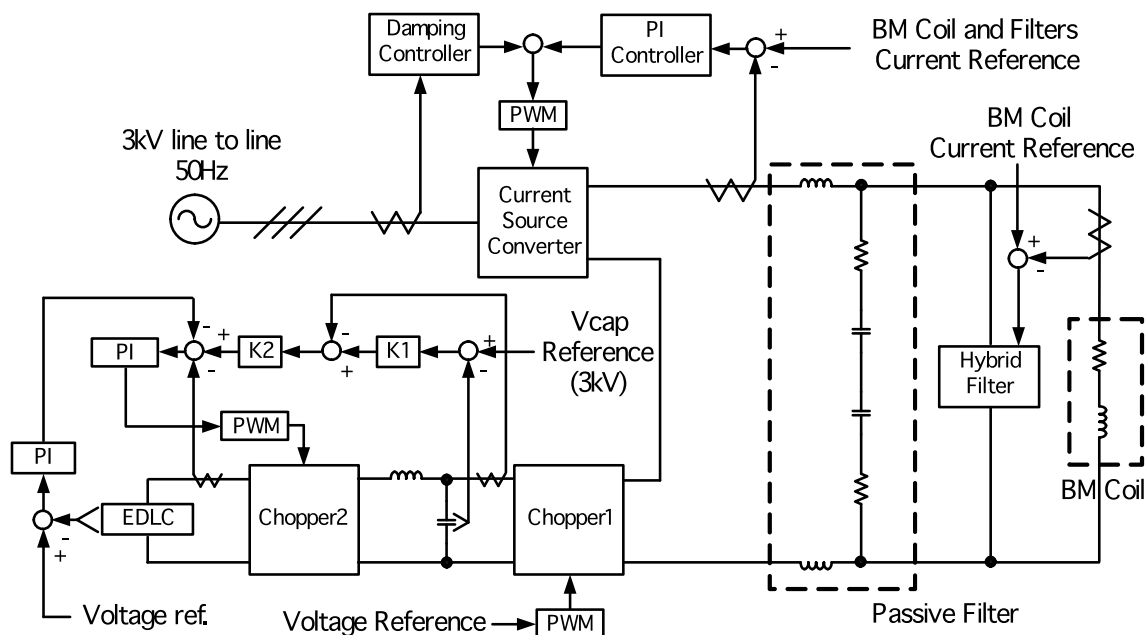


図 4.4.4 EDLC を用いた電力補償装置の制御構成

#### (b) EDLC の接続台数設計

50 GeV の運転条件に基づいて、必要とされる EDLC の接続台数について検討を行った。30 GeV 運転の場合についても補償電力の大きさの変更等により同様に設計が可能である。

設計するにあたり、検討した条件は次の通りである。

- i. 約 4 MJ のエネルギー補償が最低限必要
- ii. 直列電圧が 1.5 kV 以下とし、EDLC の定格電圧に余裕を持たせるように直列数を決定 (セル毎の電圧アンバランスによる問題が発生しやすくなるため、EDLC の直列数を制限する)
- iii. EDLC 1 台当たりの温度上昇が許容値である 20 K 以下になるように並列数を決定 (周囲温度 40 °C, 盤内温度上昇 : 5 K)
- iv. 長期利用して性能が劣化した条件で検討 (内部抵抗 : 定格の 150%, 静電容量 : 定格の 80%とする)

特に iii の温度条件は設計に大きな影響を与える。本検討では、表 4.4.1 に示す市販の電力用途用 EDLC を用いた場合の接続台数について検討するものとし、EDLC の温度上昇は実験から求めた経験式を用いて、EDLC の損失電力から算出する。

設計した EDLC の構成等を表 4.4.2 に示す。直列数 30 (直列電圧 1.62 kV), 並列数 48 (合計 1440 台) で、全体の静電容量は 67.84 F, 等価的な内部抵抗 0.0094 Ω となっ

た。なお、シミュレーションでは、EDLCは、静電容量 67.84 F、内部抵抗 0.0094 Ω の RC 直列回路として表している。

検討した EDLC 1 台の大きさは、380 × 175 × 110（単位：mm）であるので、1440 台接続時の全体の体積は 10.5 m<sup>3</sup> となった（EDLC のみの体積を考慮）。また、EDLC の総エネルギー量は、電力補償に必要なエネルギー量 4 MJ に対し、111.3 MJ とかなり大きな値となった。これは、EDLC の電流定格による制約によるものではなく、温度上昇を 20 K 以下にするために並列数が増えたためである。より損失が少なく温度上昇が少ない EDLC であれば総エネルギー量を低減することができると思われる。

表 4.4.1 検討した EDLC の諸元

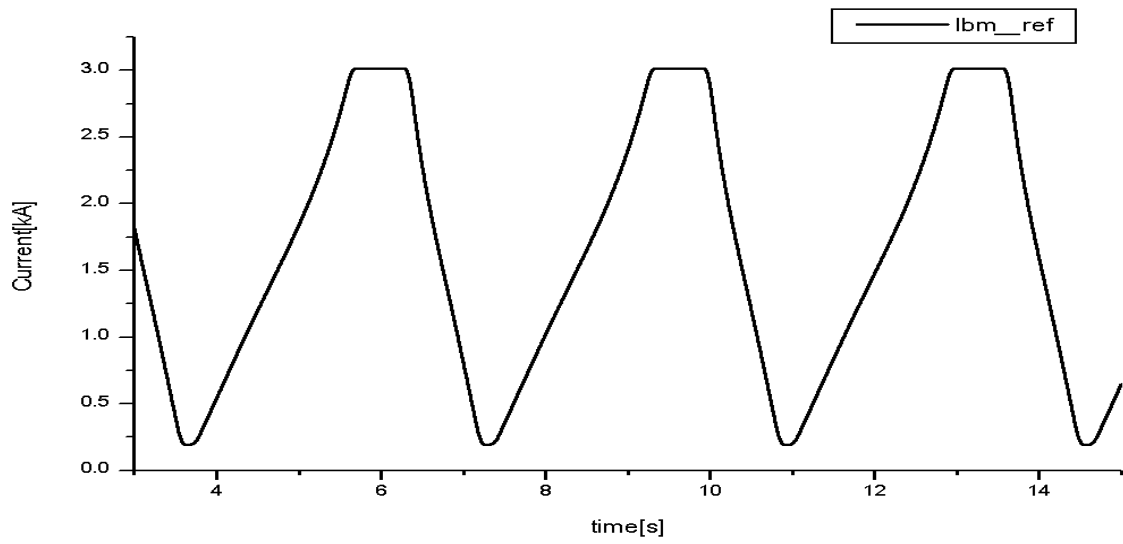
型番	指月電機 FML-XX	内部抵抗	0.01 Ω
定格電圧	54 V	許容温度上昇	20 K
定格容量	53 F	サイズ	380 × 175 × 110 mm
定格電流	60 A	重量	8.2 kg

表 4.4.2 EDLC の接続台数の検討結果（50 GeV 運転）

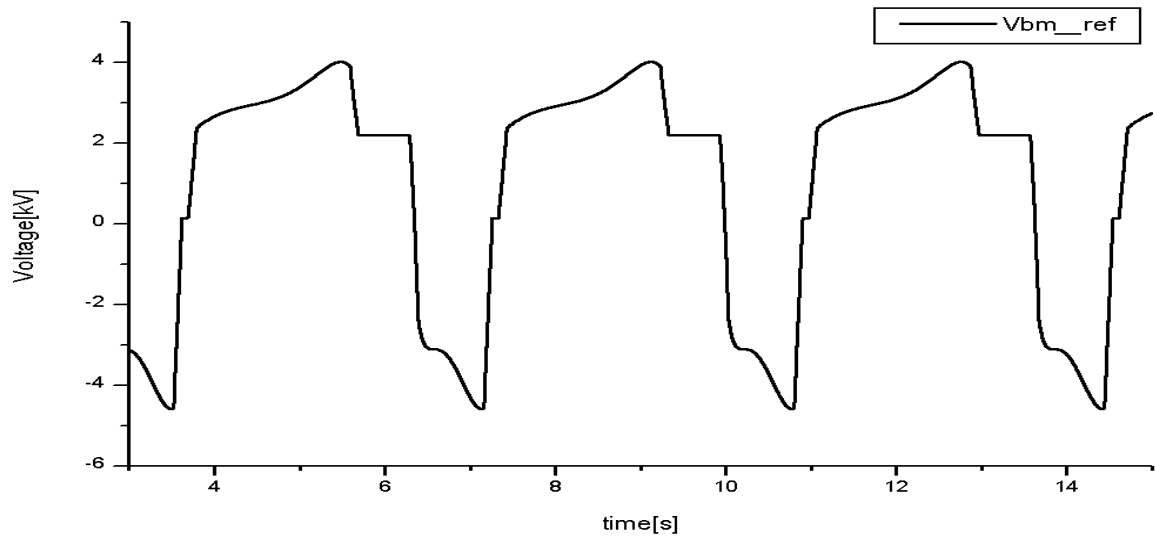
直列数	30 (1.62 kV)	全体等価内部抵抗	0.0094 Ω
並列数	48	全体静電容量	67.84 F
総数	1440	総エネルギー量	111.3 MJ

### (c) 運転シミュレーション

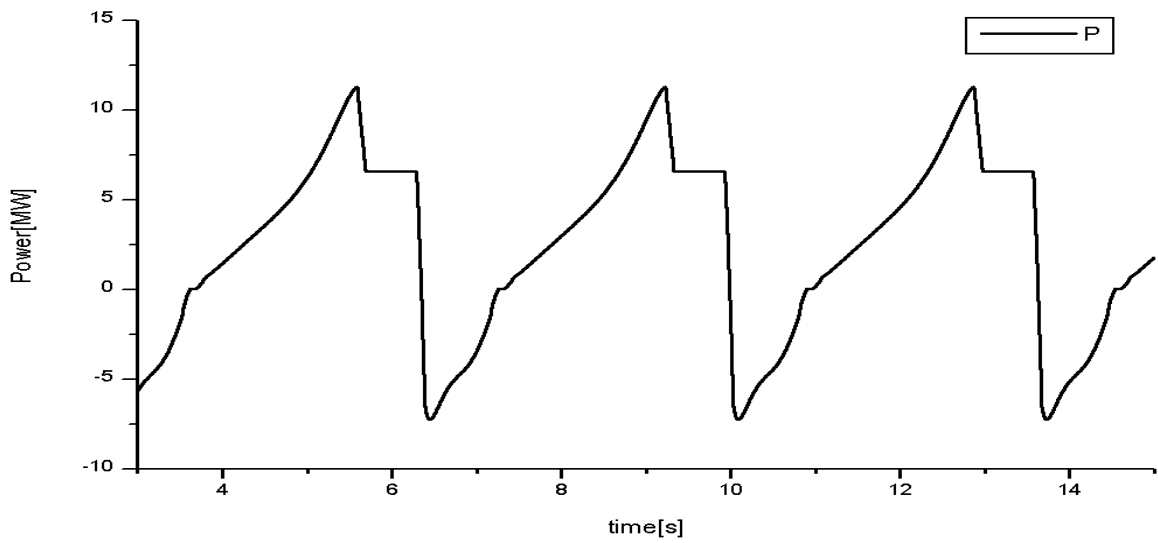
図 4.4.3、4.4.4 の回路構成・制御系を用いて、1 ユニットの 50 GeV 運転のシミュレーションを行った。回路シミュレーションはソフトウェア PSCAD/EMTDC を用いた。図 4.4.5 に電力補償を行わない場合の Bending Magnet の電流指令値、電圧指令値とその場合の消費電力を示す。消費電力はピークで 11.3 MW に達する。図 4.4.6 に電力補償を行った場合のシミュレーション結果を示す。まず 3.64 秒周期の指令値通りの電流・電圧波形が得られていることを確認した。次に系統側有効電力のピーク値も 7.4 MW となり、要求された電力変動幅（8 MW）以内に抑制されることを確認した。また、EDLC の充放電電力も入出力がバランスし周期定常状態が維持されていることより、制御が良好に行われていることを確認した。



(a) 電流指令値



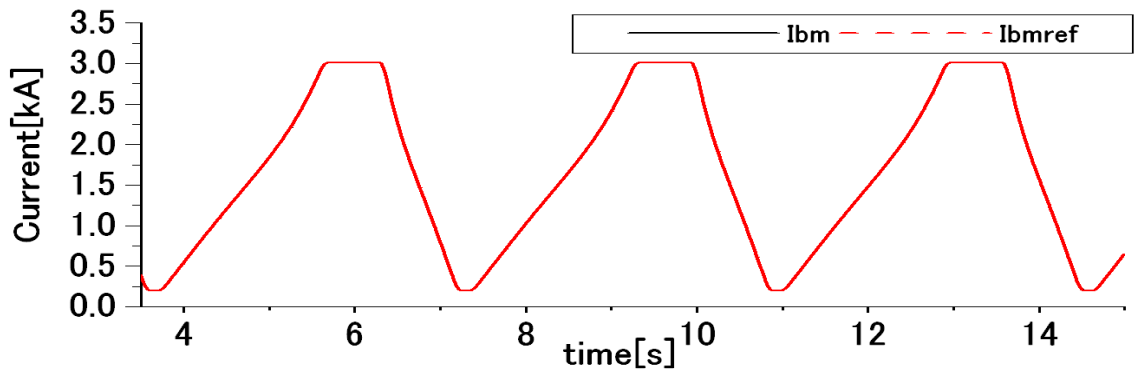
(b) 電圧指令値



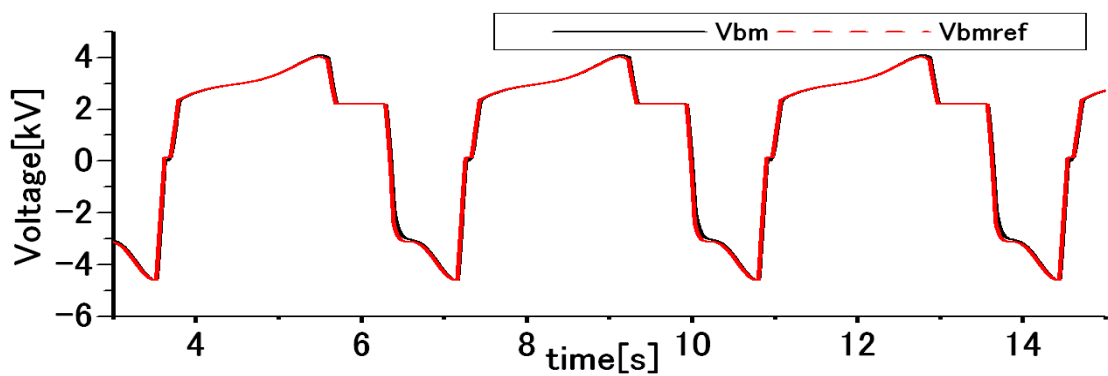
(c) 消費電力

図 4.4.5 50 GeV 運転の Bending Magnet の電流・電圧指令値と消費電力（電力補償なし）

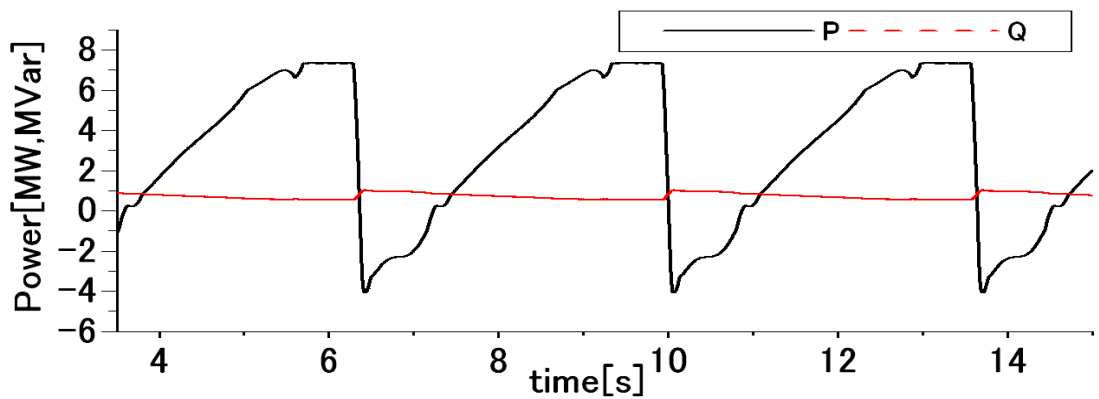




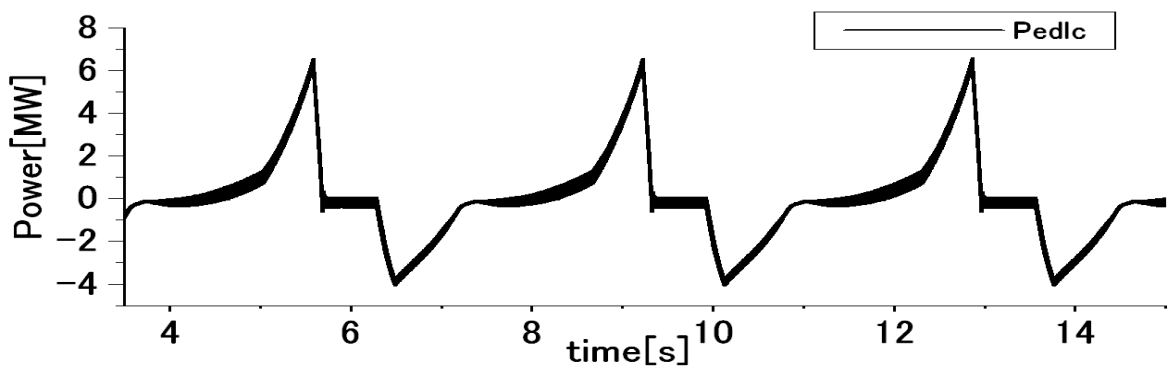
(a) Bending Magnet 電流



(b) Bending Magnet 両端電圧



(c) 交直変換器交流側の有効・無効電力



(d) EDLC 充放電電力

図 4.4.6 EDLC による直流側電力補償を行った場合のシミュレーション結果

EDLC の温度上昇は、EDLC における損失電力から経験式を用いて算出した。結果を表 4.4.3 に示す。温度上昇は 19.9 K となり、設計通り 20 K 以内に収まっていることを確認した（初期温度 45 °C）。また強制風冷にした場合には、温度上昇は 11.5 K まで低減されるので、EDLC の台数を低減できると考えられる。

表 4.4.3 EDLC の温度上昇の計算結果（50 GeV 運転）

自然冷却	19.9 K
強制風冷	11.5 K

#### 4.4.3 EDLC のまとめ

EDLC を電力貯蔵装置として用いて直流側で電力補償する場合の回路構成とその制御方法について紹介し、50 GeV 運転の条件においてその電力変動を十分に抑制できることをシミュレーションによって確認した。また、市販の EDLC の製品を用いて電力貯蔵装置の構成を検討し、EDLC の電流定格ではなく許容される温度上昇値から台数設計を行った。

EDLC は SMES に比較して、冷凍機が不要であること、メンテナンスフリーであること、設置が容易で設置期間が短くて済むなどの利点があり電力貯蔵装置として魅力的であるが、許容される温度上昇値から台数設計を行う必要があり、EDLC の性能によっては必要とされるエネルギー量に対して設備容量が大きくなってしまう可能性があることに留意する必要がある。

## 5. 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 50 GeV 電源電力補償装置の特徴、得失の比較を表 5.1 に示す。EDLC は一種のキャパシタであるが、比較表には別途記載した。

超電導 FW は開発中であり実用の点で実績はないが比較表に記述した。同様に、高温超電導導体を用いる SMES に関しても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。

表 5.1 J-PARC 50 GeV 電磁石電源電力補償装置比較表

方式	キャパシタ	PW	超電導PW(開発中)	SMES	EDLC	
取扱い	コナデンサ1個あたり人力で運搬可能、一面のサイズを調整することで重量は調整できる。ファストイオンズによる安全対策が必要 付帯設備無し	フライホイールの大きさはこのエネルギーの場合、発電機のロータのみで十分である。発電機の運用や保守はJT-60での経験がある。その経験から一般の産業機器である。	輸送距離以内のサイズの部品を運搬し、現地組立てが可能である。ロータ駆動時の安全性担保に必要の機器の強度検討が必要。液体冷却は不使用なのでその面の心配は不要。	超電導コイルは、貯蔵容量や出力に依り設計が可能であるが、クワイアスタックの大きさを輸送制限以内に取り込む必要がある。主な付帯設備として、冷凍システムやコイル保護装置がある。液体ヘリウム冷却の場合は、故障時のヘリウム蒸発による酸欠防止対策等が必要。	基本的に電解キャパシタと同様に取り扱いが容易 EDLC1個(45F)はハンドリフトで搬入出できる重量	
耐久性	15万時間(1tを繰り返して)以下で容量減少	運転回数は無制限	運転回数は無制限	原理的に無制限	充放電による温度上昇が寿命に影響するとのデータが存在するとのデータがある 秒オーダーの充放電繰り返しで15年程度(有効容量70%) 基本的に電解キャパシタと同様 屋外用あり	
経済性	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	基本的には屋内用 屋外用はケースが必要であるため、設備スペースが大きくなる。 コナデンサの使用により、屋内は様コナデンサを半屋外で使用予定 コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	同期発電機タイプの場合 0.5万円/kWh + 駆動油用可逆インバータコンバータ 3万円/kWh、フライホイール用はMJ当たり30万円、電力、エネルギーを増量するにはフライホイール付が型式競争電動機を並列にする。これは80.7万円/kWh程度 年一回の定期点検 電源オペレータが兼任。 規模によるが10万/1mFのコスト 電源本体の設置面積にほぼ内包できる。 コナデンサの増量分、トランス&整流器の減少分の差し引き コナデンサの増量分、トランス&整流器の減少分の差し引き	貯蔵容量と出力のパランスにより変動。 貯蔵容量: 2~6万円/kWh 変換装置部: 2~5万円/kWh 冷凍システムの定期点検(年1回程度) 無人遠隔監視での運転実績あり。 貯蔵部の経年劣化による故障は想定していない。(30年以上の寿命) コイルからの誘起磁界対策による、クワイアスタックから数mの範囲には機器の設置は避ける必要あり。 90%以上 特に加圧器の電力補償のように常時稼働している場合には効率が高い	直流通補償、交流制補償ともに変換器コストはSMESと同等と考えられる 年一回の定期点検 電源オペレータが兼任 無人遠隔監視での運転実績あり コナデンサの交換 SMES(冷凍機を含まず)よりは容量が大きくなる 高圧連系 EDLC機30F(45F×6モジュール)+インバータ 額100kVA+TR額120kVAで4m×1m 80%	
設置面積	75%を目標	充電放電、往復で70%以上	充電放電、往復で70%以上	90%以上 特に加圧器の電力補償のように常時稼働している場合には効率が高い	80%	
エネルギー効率	高速	高速(10 ms程度)	高速(10 ms程度)	高速	高速	
応答速度	電界エネルギーで貯蔵	回転エネルギーで貯蔵	回転エネルギーで貯蔵	磁界エネルギーで貯蔵	電界エネルギーで貯蔵	
特徴	直流通補償	交流制補償	交流制補償	直流通補償	直流通補償	
補償方式	ロス分のみ補給	ロス分のみ補給	ロス分のみ補給	ロス分のみ補給	ロス分のみ補給	
主変換器	モジュールによる実証試験 QERN-PS2採用	エネルギー再生用キャパシタ用変換器を介して、電源と負荷に直列に接続される。この場合、電源は負荷や回路の抵抗による損失を補償するだけでよいので、電源変換器の容量を小さくすることが可能。変換器を介して負荷に供給するエネルギーの総量は変わらないため、電源とフライングキャパシタ用変換器に必要な容量の合計は変わらない。	エネルギー再生用キャパシタ用変換器を介して、電源と負荷に直列に接続される。この場合、電源は負荷や回路の抵抗による損失を補償するだけでよいので、電源変換器の容量を小さくすることが可能。変換器を介して負荷に供給するエネルギーの総量は変わらないため、電源とフライングキャパシタ用変換器に必要な容量の合計は変わらない。	現在の回路構成(電流変換器+コイル)の直流通補償(コイル側)にEDLCを2台のチョップパ、直流通補償キャパシタを介して接続する構成(別図参照) 交流変換器を介して系統と接続。初期充電用に電流制限回路が必要	隣低補償用で実績、12 MVA*秒(TMEIC)の大容量製品も存在 隣低対策用、電鉄電力再生用 現在の回路構成(電流変換器+コイル)の直流通補償(コイル側)にEDLCを2台のチョップパ、直流通補償キャパシタを介して接続する構成(別図参照) 交流変換器を介して系統と接続。初期充電用に電流制限回路が必要	
実績	エネルギー再生用キャパシタ用変換器を介して、電源と負荷に直列に接続される。この場合、電源は負荷や回路の抵抗による損失を補償するだけでよいので、電源変換器の容量を小さくすることが可能。変換器を介して負荷に供給するエネルギーの総量は変わらないため、電源とフライングキャパシタ用変換器に必要な容量の合計は変わらない。	JT-60、沖浦電力、電鉄(京浜急行)、核融合科学研究所、日本での実績が多く、電力発電分野でも注目されている。	JT-60、沖浦電力、電鉄(京浜急行)、核融合科学研究所、日本での実績が多く、電力発電分野でも注目されている。	国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み	国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み	国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み
制御性	通常の電源制御以外にエネルギー再生用キャパシタの電圧制御を行う必要がある。エネルギー再生用キャパシタの電圧制御は、カ行時の出力電圧のフリーフォワード制御である。再生時はエネルギー再生用キャパシタの電圧を制御する。制御の切り替えと安全設計に注意が必要である。	エネルギー再生用キャパシタの電圧を制御する。制御の切り替えと安全設計に注意が必要である。	エネルギー再生用キャパシタの電圧を制御する。制御の切り替えと安全設計に注意が必要である。	国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み	国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み	国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み
直流通リプル	直流通リプルは電源変換器の性能に依存する。	直流通リプルは電源変換器の性能に依存する。	直流通リプルは電源変換器の性能に依存する。	直流通リプルは電源変換器の性能に依存する。	直流通リプルは電源変換器の性能に依存する。	
高調波	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	
付帯設備	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20% コナデンサの増量分が15~20%	

## 6. まとめ

J-PARC 50 GeV電磁石電源の電力補償装置の特徴、得失について検討を行った。50 GeV主リングは1秒周期で加減速を行い、年間5000時間連続運転し、10年以上にわたって稼働する。繰り返し回数は2億回に達する。このとき加速器電磁石と電力系統との間で電力のやりとりがあり、系統に許容以上の周波数と電圧変動を引き起こす。そのために何らかの電力補償装置（貯蔵装置）の設置が必要であり、現在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り、今回のJ-PARC 50 GeV電磁石電源の電力補償装置には間に合わないが、SMESの技術的可能性を明確にするため、比較対象に加えた。

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。また、インダクタンス成分がほとんどであるJ-PARC 50 GeV電磁石から回生したエネルギーを、インダクタンス成分に貯蔵するSMESと、キャパシタンス成分に貯蔵するキャパシタあるいはEDLCで技術的優位性に本質的な差がある可能性もあるが、今回の検討の中では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。

今回の検討結果がJ-PARC 50 GeV 電磁石電源の電力補償装置を設計・設置する上で参考になれば幸いである。

なお、執筆担当は以下の通りである。

第1章：佐藤皓（KEK）

第2章：新富孝和（日大）、佐藤皓（KEK）

第3章：中村衆（KEK）

第4章 第1節：栗本佳典（KEK）

第2節：嶋田隆一（東工大）、長嶋賢（鉄道総研）

第3節：平野直樹（中部電力）、野村新一（明大）、嶋田隆一（東工大）

第4節：伊瀬敏史（阪大）、三浦友史（阪大）

第5章：佐藤皓（KEK）、内藤富士雄（KEK）、新富孝和（日大）、秋田調（電力中研）

第6章：秋田調（電力中研）、佐藤皓（KEK）、内藤富士雄（KEK）、新富孝和（日大）

## 巻末資料 1

### 作業部会

#### 第 1 回 :

日時 : 平成 25 年 6 月 13 日 (木) 15 : 00 ~ 17 : 15

場所 : 日本大学第 2 別館 4 階会議室

出席 : 秋田 (電中研), 佐藤 (KEK), 長嶋 (鉄道総研), 中村 (KEK), 野村 (明治大学), 平野 (中電), 新富 (日大) (敬称略)

資料

S1-0 : 中村衆, 栗本佳典, 森田裕一, J-PARC MR の新電源開発状況, 2013 年 6 月 13 日

S1-1 : F. Bordry et al., CERN-PS MAIN POWER CONVERTER RENOVATION: HOW TO PROVIDE AND CONTROL THE LARGE FLOW OF ENERGY FOR A RAPID CYCLING MACHINE, Proc. PAC05.

S1-2 : R. Gehring et al., A SMES-Based Power Supply for Accelerator Magnets, IEEE Trans. Appl. Supercond., 2006.

S1-3 : I. Marneris et al., SIMULATIONS OF THE AGS MMPS STORING ENERGY IN CAPACITOR BANKS, Proc. PAC07.

S1-4 : C. Fahrni et al., A novel 60 MW Pulsed Power System based on Capacitive Energy Storage for Particle Accelerators, EPE Journal, Vol. 18-4.

S1-5 : J-P. Burnet, A novel 60 MW Pulsed Power System based on Capacitive Energy Storage, Workshop on Energy for Sustainable Science, Lund, 2011.

S1-6 : P. Tixador, SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) present status & future, Workshop on Energy for Sustainable Science, Lund, 2011.

S1-7 : SMES研究会報告書第 2 章原稿

#### 第 2 回 :

日時 : 平成 25 年 7 月 23 日 (火) 10 : 00 ~ 12 : 05

場所 : 日本大学第 2 別館 4 階会議室

出席 : 秋田 (電中研), 佐藤 (KEK), 嶋田 (東工大), 内藤 (KEK), 長嶋 (鉄道総研), 中村 (KEK), 野村 (明治大学), 平野 (中電), 松本 (富士電機), 三浦 (阪大), 新富 (日大) (敬称略)

資料

S2-0 : 第 1 回作業部会議事録

S2-1 : 電力補償装置比較表

S2-2 : 馬場旬平他, 「ICB エネルギー転送回路における動作不安定性の解析~位相角によるリップル低減制御の安定化~」, T. IEE Japan, vol. 121-D, No. 4, 2001.

S2-3 : 嶋田隆一, J-PARC MR 電源の増力の考察-SMES 案, コンデンサ案, フライホイール案

S2-4 : 中部電力株式会社, 高温超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

S2-5 : T. Katagiri et al., Field test result of 10 MVA/20 MJ SMES for load fluctuation compensation,

IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, No. 3, pp. 1993-1998, June 2009.

S2-6 : H. Akagi and H. Sato, Control and performance of a couple-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system, IEEE Trans. Power Electronics, vol. 17, no. 1, pp.109-116, Jan. 2002.

S2-7 : 富澤太一, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「電気二重層キャパシタによる大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償」, 平成21年電気学会全国大会発表資料

### 第3回 :

日時 : 平成25年8月30日(金) 10:00~12:10

場所 : 日本大学第2別館4階会議室

出席 : 秋田(電中研), 佐藤(KEK), 嶋田(東工大), 中村(KEK), 野村(明治大学), 新富(日大)(敬称略)

資料

S3-0 : 第2回作業部会議事録

S3-1-1 : 電力補償装置比較表-新富

S3-1-2 : 電力補償装置比較表-中村

S3-1-3 : 電力補償装置比較表-長嶋

S3-2 : 嶋田隆一, 「磁界コイル電源のエネルギー源とその基本構成」

S3-3-1 : 野村新一, 「YBCO線材を用いたSMES用超伝導コイルのあたり計算」

S3-3-2 : S. Nomura et al, "Feasibility study on large scale SMES for daily load leveling using force-balanced helical coils," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, p. 5700904, 2013.

S3-4-1 : 新富孝和, 佐藤皓, 「J-PARC主リング電源電力変動補償」

S3-4-2 : 佐藤皓, 「J-PARC-MR電磁石電源電力」

S3-5 : 下川哲司他, 「電磁石電源のためのフライイングキャパシタ方式の原理実証」, 平成25年度加速器学会

S3-6-1 : 長屋重夫, 「超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発」, イットリウム系超電導電力機器技術開発(事後評価)第1回分科会資料7-1

S3-6-2 : S. Nagaya et al., "The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan," Cryogenics 52 (2012) 708-712.

S3-7 : 「エネルギー貯蔵論文リスト(J-PARC履歴を含む)」

### 第4回 :

日時 : 平成25年11月29日(金) 10:00~12:20

場所 : 日本大学第2別館4階会議室

出席 : 秋田(電中研), 佐藤(KEK), 嶋田(東工大), 中村(KEK), 内藤(KEK), 仁田(明星大), 野村(明治大学), 平野(中部電力), 新富(日大)(敬称略)

資料

S4-1 : J-PARC主リング電源電力変動補償の検討原稿案

- S4-2 : J-PARC主リング電源電力変動補償関連文献リスト
- S4-3 : J-PARC主リング電源電力変動補償装置比較表-ver2
- S4-4 : FW/SMES/Capacitorの導入例
- S4-5 : History of the studies for energy storage system at KEK
- S4-6 : SMES national project in Japan

## 巻末資料 2

### J-PARC-MR 電磁石電源電力補償関連文献リスト

#### J-PARC 履歴

- ・ 「大強度陽子加速器計画の立案から建設まで」, News@KEK, 2008年1月10日, <http://legacy.kek.jp/newskek/2008/janfeb/J-PARC5.html>.
- ・ ニューマトロン計画, 坂井光夫: 日本物理学会誌 30 (1975) 330. 杉本健三, 他: 日本物理学会誌 30 (1975) 333.
- ・ 大ハドロン加速器計画提案書 大ハドロン計画ワーキンググループ, 大ハドロン加速器タスクフォース 昭和 61 年 4 月.
- ・ 大型ハドロン計画, 福田共和, 西川公一郎, 日本物理学会誌 vol. 43(6), 421-428, 1988
- ・ 大型ハドロン計画提案書 1997年5月14日 高エネルギー加速器研究機構大型ハドロン計画推進室.
- ・ 大強度陽子加速器計画 1999年11月 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構経堂推進チーム, KEK Report 99-5/JAERI-Tech 2000-003/JHF-99-4, December 1999, A/H/M.
- ・ J-PARC-MR 大強度化検討会 (第三回, 2012/7/31), J-PARC-MR 主電磁石電源レビュー委員会 (2012/10/2)  
<http://jnusrv01.kek.jp/Indico/conferenceDisplay.py?confId=583>.

#### フライホイール

- ・ 「京浜急行電鉄(株)納め電車線用フライホイール発電電動機」, 島津登志成, 橘浩司, 三菱電機技報, vol.63, no.8, 1989, pp. 662-665.
- ・ 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.
- ・ 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.
- ・ 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システムの安定化」 (課題番号: 11650308) .
- ・ 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 '99 Power Electronics Specialists Conference, Charleston, June 27-July 2, 1999, 32-39.
- ・ H. Akagi and H. Sato, “Control and Performance of a Doubly-Fed Induction Machine



Intended for a Flywheel Energy Storage System,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 17 (2002) 109-116.

- 加藤修平, 程苗苗, 炭谷英夫, 嶋田隆一, 「フライホイール誘導機式瞬低保護装置の貯蔵容量設計と 50 kW 機による実験的検証」, 電気学会論文誌 D, vol. 129-D, no. 4, pp. 446-452, 2009.
- 嶋田隆一, 「フライホイールによる電力安定化」, OHM, 2007 年 2 月号, p. 32.
- 「フライホイールによるエネルギー貯蔵 (米国)」, NEDO 海外レポート no. 1066, 2010.9.15, [www.nedo.go.jp/content/100106049.pdf](http://www.nedo.go.jp/content/100106049.pdf).
- Beacon Power 社  
<http://www.beaconpower.com/products/flywheel-energy-storage.asp>.
- <http://www.beaconpower.com/products/flywheel-energy-storage.asp>.

## SMES

- 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.
- M. Masuda, T. Shintomi, H. Sato, and A. Kabe, “Superconducting Energy Storage Magnets,” IEEE Trans. Magnetics, MAG-15 (1979) 318
- T. Shintomi, M. Masuda, H. Sato, and K. Asaji, “3-MJ Magnet for Superconductive Energy Storage,” Advances in Cryogenic Engineering, 25 (1980) 98-104.
- 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.
- W.V. Hassenzahl, “Will Superconducting Magnetic Energy Storage be Used on Electric Utility System,” IEEE Trans. Magnetics, MAG-11, 1975.
- R.W. Boom et al, Wisconsin Superconducting Energy Storage Project, vol. 1, Engineering Experiment Station, Univ. of Wisconsin, July 1, 1975.
- Jumpei Baba, Tanzo Nitta et al., “Power conditioning method for SMES by use of ICB energy transfer circuit,” EPE2001-Graz.
- 仁田且三, 他, 「ICB エネルギー転送回路における動作不安定性の解析」, T. IEE Japan vol. 121-D, no4, 2001, p. 484.
- 平成 15 年度高エネルギー加速器研究機構共同開発研究申請書, 報告書.
- 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.
- 「瞬低補償用 SMES, シャープ亀山工場」, Press Release, 中部電力, 2003 年, [http://www.chuden.co.jp/corpo/publicity/press2003/0221\\_1.html](http://www.chuden.co.jp/corpo/publicity/press2003/0221_1.html)  
産総研, RASMES 2011.10, vol. 37.

- 平成 15 年度高エネルギー加速器研究機構共同開発研究申請書, 報告書.
- S. Nagaya et al., “Development and performance results of 5 MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 699–704, Jun. 2004.
- T. Mito et al., “Development of UPS-SMES as a Protection from Momentary Voltage Drop,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 721–726, Jun. 2004.
- 平成 18 年度高エネルギー加速器研究機構共同開発研究成果報告書, 「研究課題 : エネルギー貯蔵装置 (SMES, FW) によるシンクロトロン電磁石電源の負荷変動補償の研究」.
- 山本茂晴, 三浦友史, 伊瀬敏史, 佐藤皓, 新富孝和, 「直流接続形 SMES による大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償」, 平成 18 年電気学会半導体電力変換研究会, 産業技術総合研究所, 7 月 13 日・14 日.
- R. Gehring, et al., “A SMES-Based Power Supply for Accelerator Magnets,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no. 2, June 2006.
- 「電力系統制御用 SMES(スメス) (超電導電力貯蔵システム) の実証試験開始について」, Press Release, 中部電力, 2007 年.  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_0334A.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0334A.html).
- 瀬木寛人, 三浦友史, 伊瀬敏史, 新富孝和, 佐藤皓, 「直流接続型 SMES による大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償-小型実験装置による特性検証-」, 平成 20 年電気学会半導体電力変換研究会 SPC-08-70, March 2008.
- H. Sato, K. Okamura, T. Ise, Y. Miura, S. Nomura, R. Shimada, T. Shintomi, and S. Yamamoto, “Application of the SMES for the Large Scale Accelerator Magnet Power Supply,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, no. 2, 2008, pp. 779-782.
- RASMES 研究会平成 20 年度研究報告書, 平成 21 年度研究報告書.
- 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.
- Hikaru Sato, Takakazu Shintomi, Toshifumi Ise, Yushi Miura, Shinichi Nomura, and Ryuichi Shimada, “Application of Energy Storage System for Stabilization of Accelerator Magnet Power Supply,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3. 2010, pp. 1312-1315.
- Shin-ichi Inage, “Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids,” International Energy Agency, 2009.  
[www.environmentportal.in/files/energy\\_storage.pdf](http://www.environmentportal.in/files/energy_storage.pdf).
- W.V. Hassenzahl, SMES 研究会第 301 回公開拡大技術委員会講演, “SMES: A Historical Perspective,” 2012.

- S. Nagaya et al., “The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan,” *Cryogenics*, 52 (2012) 708-712.
- Qiang Li, “Status and Future Prospect of SMES for Grid Applications,” *Advanced Microgrid Concepts and Technologies Workshops*, Washington DC, June 7-8, 2012  
<http://www.arlevents.com/microgrids2012/briefings/7/1125-qiang-li.pdf>.
- Ramesh Gupta, “ReBCO and BSCCO Coils at BNL,” *MAP HTS MAGNET WORKSHOP*, Fermi National Accelerator Laboratory, May 30-31, 2012.  
<http://www.bnl.gov/magnets/Staff/Gupta/Talks/map-hts-fnal-2012/gupta-map-hts-may2012-fnal.pdf>.
- イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト NEDO エネルギー対策推進部, 2010/8/10, [www.nedo.go.jp/content/100095838.pdf](http://www.nedo.go.jp/content/100095838.pdf).
- T. Isobe, K. Ito, S. Nomura, T. Matsukawa, and R. Shimada, “Low Loss and Compact Grid Connecting Converter for Superconducting Magnet Using MERS,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, issue 3, pages 5400304, June 2012.
- Hans-Joerg Eckholdt, “SMES usage and power grid applications at RIs,” *2nd Workshop on Energy for Sustainable Science at Research Infrastructures*, 23-25 October, 2013, CERN, <https://indico.cern.ch/confSpeakerIndex.py?confId=245432>.

#### キャパシタ (EDLC 含む)

- I. Marneris et al., “Simulations of the AGS MMPS storage energy in capacitor banks,” *Proceedings of PAC07*, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 652-654.
- 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.
- Jean-Paul Burnet, “A novel 60 MW Pulsed Power System Based on Capacitive Energy Storage,” <http://europeanspallationsource.se/energyworkshop>.
- <http://cern.ch/energy.sustainable-science2013>.
- 清水孝浩 他, 「電気二重層キャパシタを用いた電力回生吸収装置 (キャパシタ) の導入」, *JREA*, vol. 51, no. 6, pp. 33423-33425, 2008.
- 富澤, 三浦, 伊瀬: 「電気二重層キャパシタによる大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償」, 平成 20 年電気学会 電力・エネルギー部門大会, 35-19 (2008).
- 富澤, 三浦, 伊瀬: 「大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償 -電気二重層キャパシタと超伝導コイルの特性比較-」, 平成 20 年電気関係学会 関西支部連合大会, G5-23 (2008).
- 富澤, 三浦, 伊瀬: 「大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償 -補償方式及び電気二重層キャパシタの容量低減-」, 平成 21 年電気学会 全国大会, 4-124 (2009).

- ・ 富澤, 三浦, 伊瀬 : 「電気二重層キャパシタによる大強度陽子加速器用電磁石電源の電力変動補償システム」, 電気学会 半導体電力変換研究会, SPC-09-111 (2009).
- ・ 植田善延 他 : 「電気二重層キャパシタ式マイクログリッド系統安定化装置」, 電気学会研究会資料. PE, 電力技術研究会 2008 (12), 25-28, 2008-01-26.
- ・ 山崎長治 他, 「群馬大学重粒子線照射施設用偏向電磁石電源の開発」, 第7回日本加速器学会年回, 2010年8月4日-6日, 姫路, p. 590.
- ・ 長谷川智宏 他, 「SAGA HIMAT 用電磁石電源の開発」, 第10回日本加速器学会年回, SAP070, 2013年8月3日-5日, 名古屋大学.
- ・ 下川哲司, 「電磁石電源のためのフライングキャパシタ方式の原理実証」, 第10回日本加速器学会年回, SUP063, 2013年8月3日-5日, 名古屋大学.
- ・ Yoshinori Kurimoto, “Development of new high slew-put and high energy-efficient power supplies for J-PARC upgrade,” 2nd Workshop on Energy for Sustainable Science at Research Infrastructures, 23-25 October, 2013, CERN, <https://indico.cern.ch/confSpeakerIndex.py?confId=245432>.

#### **SVC (dedicated for 12GeV-PS)**

- ・ 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. Nucl. Sci., NS-30 (1983) 2932-2935.
- ・ 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.
- ・ 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 Trans. Nucl. Sci., NS-39 (1992) 1490-1495.