

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	FW	超電導FW(開発中)	SMES	EDLC
取扱性	コンデンサ1個は人力で運搬可能。一面のサイズを調整することで重量は調整できる。 ファストヒュー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での経験済。その経験から一般的産業機器である。	輸送制限以内のサイズの部品を運搬し、現地組立てが想定される。ロータ破壊時の安全性担保のため容器の強度検討が重要。液体冷媒は使用なのでその面の心配は不要。	超電導コイルは、貯蔵容量や出力に応じた設計が可能であるが、クライオスタットの大きさを輸送制限以内に収める必要がある。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扱いが容易 EDLC1個(45F)はハンドリフターで搬入出できる重量
耐久性	15万時間(1Hz繰り返し)で1%以下の容量減少	運転回数は無制限	原理的に無制限	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データの存在するので設計に注意が必要 秒オーダーの充放電繰り返しで15年程度(実効容量70%)
環境	基本的に屋内用 屋外用はケースが必要であるため、設置スペースが大きくなる。 テント使用により、屋内仕様コンデンサを半屋外で使用予定	基本的に屋内、地上建屋は簡単なスレート構造屋根、空調は不要	変換器等の電気設備は屋外仕様も可能。電源貯蔵部本体は建屋内が基本。	変換器等の電気設備は屋外仕様も可能。超電導コイル周りは建屋内が基本。	基本的に電解キャパシタと同様 屋外用あり
経済性	導入コスト	同期発電機タイプの場合 0.5万円/kW+駆動汎用可逆インバータコンバータ 3万円/kW、フライホイール部は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かご型誘導電動機を並列にする。これは0.7万円/kW程度	貯蔵部:7万円/kW以下(開発目標値)	貯蔵容量と出力のバランスにより変動。 貯蔵部:2~6万円/kW 変換器部:2~5万円/kW	直流側補償・交流側補償ともに変換器コストはSMESと同等と考えられる
メンテナンス	年1回の定期点検(500万)	年1回の定期点検	発電電動機および冷凍システムの定期点検(年1回程度)	冷凍システムの定期点検(年1回程度)	年1回の定期点検
運転	電源オペレータが兼任。	起動停止も遠隔操作、無人運転	無人遠隔監視も可能。	無人遠隔監視での運転実績あり。	電源オペレータが兼任 無人遠隔監視での運転実績あり
故障時	コンデンサの交換 規模によるが10万/1mFのコスト	これまでの運転実績からほとんど故障は考えなくても良い。	貯蔵部の経年劣化による故障は想定していない。(最低20年以上の寿命)	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)	コンデンサの交換
設置面積	電源本体の設置面積にほぼ内包できる。 コンデンサの増量分と、トランス&整流器の減少分の差し引き	世界最大でも半地下式にして上から見ると直径6 m程度だった。この場合、さらに小形である。	貯蔵部のエネルギー密度はバッテリーに準ずる。ただし設置面積はロータ周囲の安全対策による。	コイルからの漏えい磁界対策によるが、クライオスタットから数mの範囲には機器の設置は避ける必要あり。	SMES(冷凍機を含まず)よりは容積が大きくなる 高圧連系 EDLC盤30F(45F×6モジュール)+インバータ盤100kVA+TR盤120kVAで4m×1m
エネルギー効率	75%を目標	充放電、往復で70%以上	開発目標は80%以上	90%以上 特に加速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%
応答速度	高速	高速(10 ms程度)	高速(10 ms程度)	高速	高速
特徴	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	磁気エネルギーで貯蔵	電界エネルギーで貯蔵
補償方式	直流側補償	コイル負荷と相性の良い電流型変換器で、扱いたれた交流電力を介して電力のバッファとする。	交流側補償	交流側補償 直流側補償	直流側補償 交流側補償
主変換器	ロス分のみ補給	系統からロス分受電。電磁石に出し入れする電力(電圧×電流)に対応した変換器が必要。ただし電流型なのでコストの安いサイリスタまたは、逆阻止IGBTのブリッジコンバータ	系統からロス分受電。電磁石に出し入れする電力(電圧×電流)に対応した変換器が必要。ただし電流型なのでコストの安いサイリスタまたは、逆阻止IGBTのブリッジコンバータ	ロス分のみ補給	ロス分のみ補給
実績	モデルによる実証試験 CERN-PSで採用	JT-60、沖縄電力、電鉄(京浜急行)、核融合科学研究所、日本での実績が多く、風力発電分野でも注目されている。	実用化の実績無し(現在開発中)	瞬低対策用で現在3台稼働中 国プロでの負荷変動補償、系統安定化の実証試験済み	瞬低補償用で実績、12 MVA×1秒(TMEIC)の大容量製品も存在 瞬停対策用、電鉄電力回生用
回路構成	エネルギー回生用キャパシタは変換器を介して、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分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できる。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、電源とライティ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。	既に設置されている電流型変換器に接続、系統交流に代わる電源とし系統への電力変動対策とともに従来の運転も可能にする。		超電導コイルには直流電流を流すことになる為、交流変換器を介して系統と接続。コイル保護回路回路として直流遮断器や保護抵抗が必要。電圧対策のため、コイル中間点で接地する回路構成もある。また、高温超電導コイルの特性を生かし、小規模のコイルに変換器を接続し、それらを相合化する回路構成も提案されている。	現在の回路構成(電流型交流変換器+コイル)の直流側(コイル側)にEDLCを2台のチョップパと直流リンク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
制御性	通常の電源制御以外にエネルギー回生用キャパシタの電圧制御を行う必要がある。エネルギー回生用キャパシタの電圧制御は、力行時は出力電圧のフィードフォワード制御であり、回生時はキャパシタ電圧のフィードバック制御となる。制御の切り替えと安全設計に注意が必要である。	コイル電流制御用の高圧電源は小容量のコンデンサバンク付電流制御電源をフライホイール発電機付直流電源と直列接続する。		国プロでの実証試験の実績として、数msでの制御が可能であることが確認されている。	コイル電流は電流型交流変換器で制御し、EDLCの充放電制御は2台のチョップパによって行う。チョップパのスイッチング周波数が十分に高ければ、制御性は良いと考えられる。 実証試験実績として数十ms
直流側リップル	ライティングキャパシタ用変換器は出力電圧のフィードフォワード制御を行うため、変換器のキャリア周波数が大きければ、直流側リップルは電源用変換器の性能に依存する。	交流を整流するので遅く、電圧リップルが大きく、精度よく電流制御は無理なので別に高速な半導体スイッチによる電流制御を直列接続する。		直流側補償では早いチョップパ周波数が可能	適切な受動フィルタの設計で対応。また抵抗と半導体素子を組み合わせたハイブリッドフィルタが適用可能。 キャリアリプル除去用コンデンサあり
高調波	エネルギー回生用キャパシタは系統に接続されないため、高調波は電源の整流器によって決まる。	従来の技術の範囲内		高調波フィルターの設置により、ガイドライン以内に抑えられることが確認されている。	交流側の高調波は現在と同等と考えられる 高調波環境目標レベル内
付帯設備	コンデンサバンクの規模が大きくなるため、回生用キャパシタの準屋外設置を検討する必要がある。電源棟以外にキャパシタ設置のためのテントハウス、コンテナなどである。	水素またはヘリウムガス中での運転で風損を半減できる		・コイルや電流リード冷却用冷凍システム ・コイル保護設備(直流遮断器、保護抵抗) ・クエンチ検出回路	特に不要。EDLCの温度上昇が問題になる場合には風冷設備が必要になる可能性がある 屋外盤は空調設備あり