

平成26年5月1日
J-PARC電力補償作業部会
報告会
KEKつくば, 3号館 第1会議室

J-PARC電力 負荷変動補償用 フライホイールの検討

1

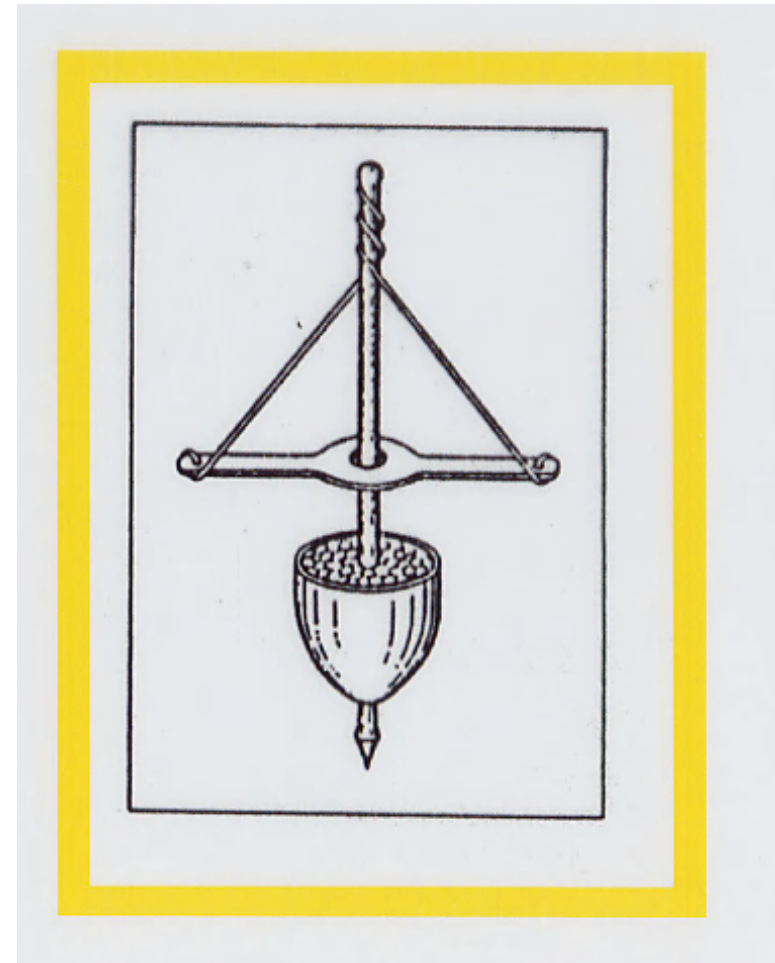
嶋田隆一
東京工業大学 名誉教授
筑波大学パワエレ寄附講座 特命教授
KEK 客員教授

世界最古のエネルギー貯蔵装置

人間は、昔から
フライホイールの
効果を知っていた

弓ドリル 石の詰まったコ
コナッツの殻はフライホ
イールの役目をする。1万
3000年前の遺跡より

インドネシアの遺跡からだそうだ



フライホイール：発電機と組み合わせて古くから使われてきた電気エネルギーの蓄積装置，鉄鋼分野ではイルグナー装置として使われていた。

- 大きいものは核融合実験装置JT-60で世界最大 4. 0GJ－160MVA, M社製, 1. 3GJ－500MVA, T社製, 2. 6GJ－400MVA H社製の3セット

- 電管用京浜急行逗子線のフライホイール・ポスト

フライホイール付かご型誘導機をインバータによる可変速運転，直流入出力，大気圧ヘリウム中で運転

- 沖縄の周波数安定化用ROTES (Rotary Energy Storage)

可変速揚水発電技術を使った一定周波数で電力系統との間で充放電を行う

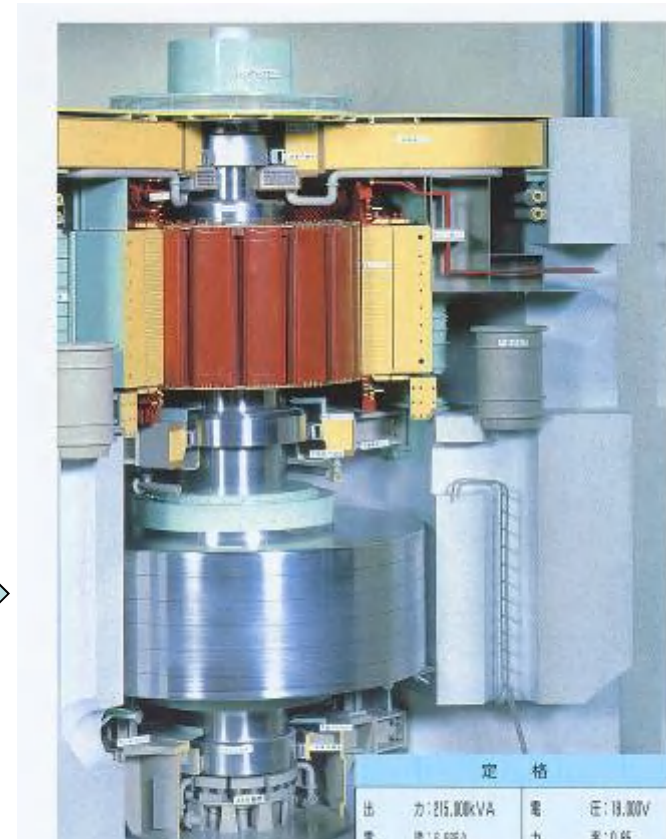
- 瞬低対策用では，ドイツP社の変圧器を兼ねる同期発電機，米国A社，B社のUPSの真空中フライホイール

フライホイールの損失は大気圧中では風損がほとんど，対策は真空だが問題が多い，モータ，発電機の冷却が困難である。風損を少なくするフライホイール・ガスを東工大で開発されている。

世界最大のフライホイール付 電動発電機 回転体の重さ1000 tons



総出力100万KWの発電機群



Flywheel MGの模型

T-MGの模型
Model of T-MG

定 格	
出力: 215,000kVA	電圧: 18,000V
電流: 6,666A	効率: 0.85
回転数: 600~480rpm	周波数: 60~60Hz
空気効果: 16,000cm ³ /min	放出エネルギー: 4,000MJ
駆動方式: サイリスタ駆動	駆動装置出力: 18,000kW

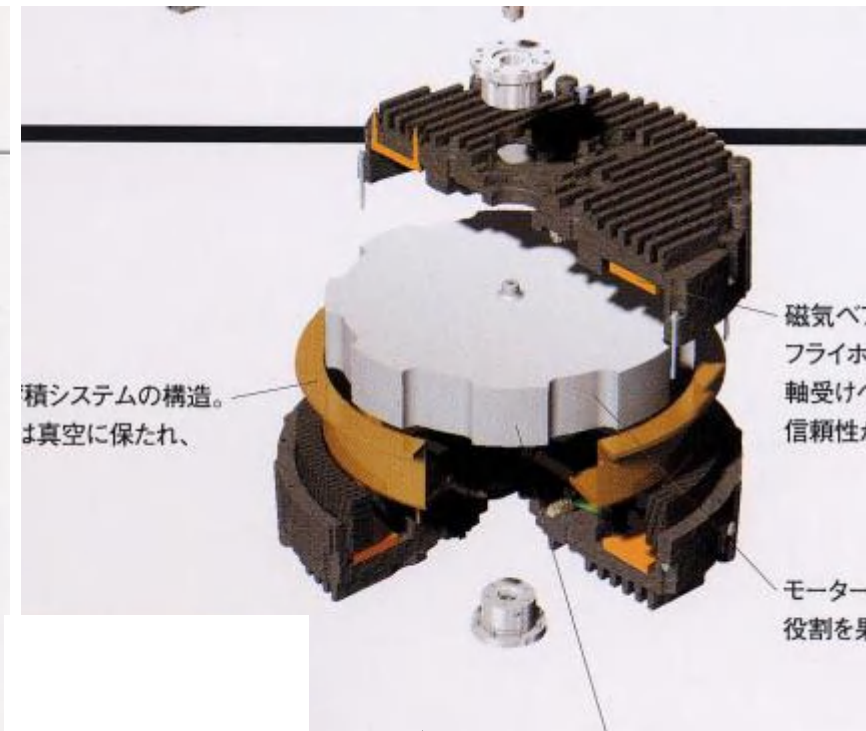
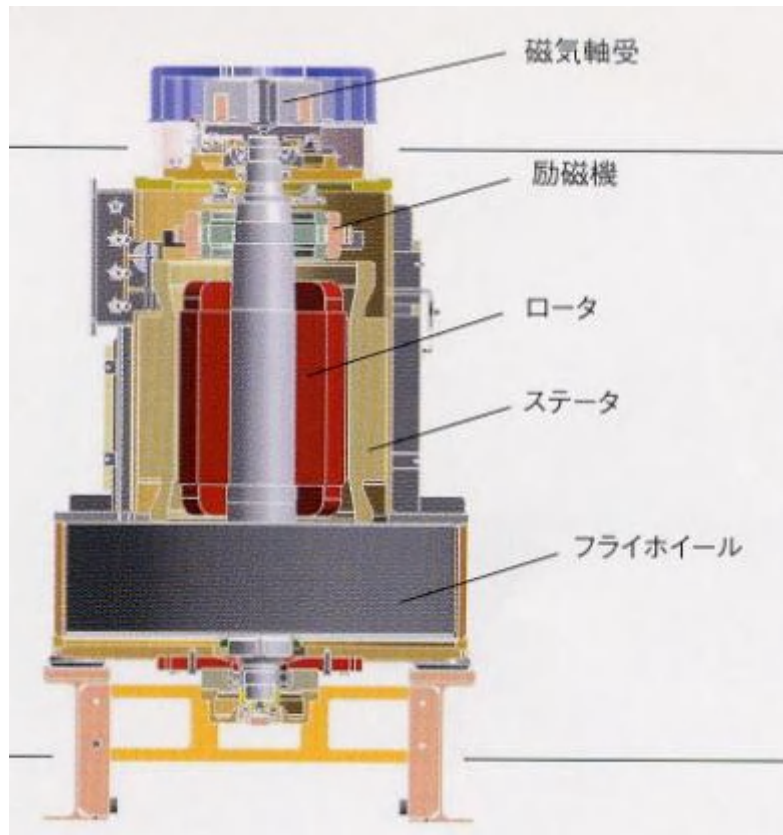
電力系に使われているフライホイール ROTES(ローテス)



沖縄本島150万kW
の電力網の安定化
に貢献



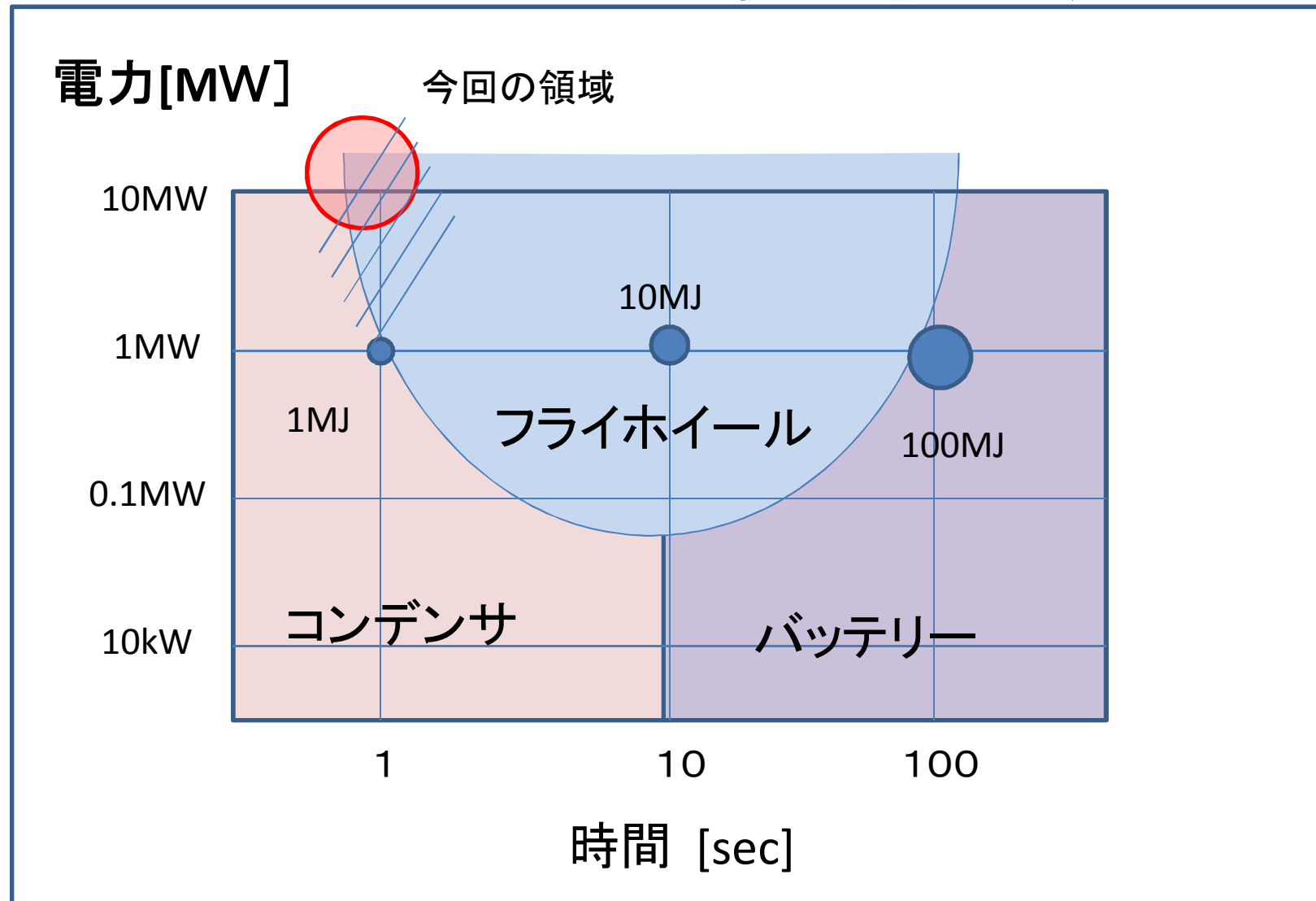
神戸製鋼から、大型のフライホイールUPS キャタピラー社から先進的フライホイールUPS



米国アクティブパワー社の先進的
フライホイール(真空中)

ドイツ・ピラー社のフライホイール(ヘリウム中)

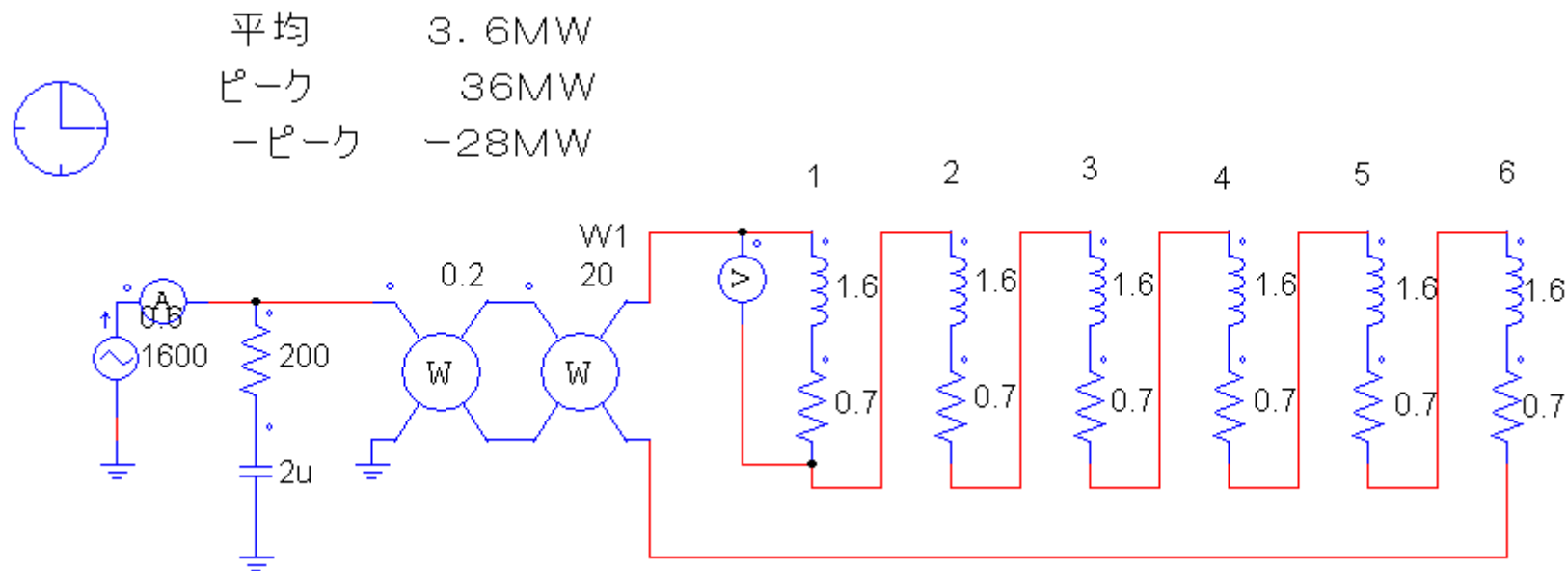
電力貯蔵手段の住み分けは エネルギー量(時間)と最大電力で決まる



今回の電源はどんなもののかの検討:コイル電流の繰り返しを速くすること

J-PARCの最大のMRコイル(1.6H, 0.7Ω)が6台
最大電流1.6kA

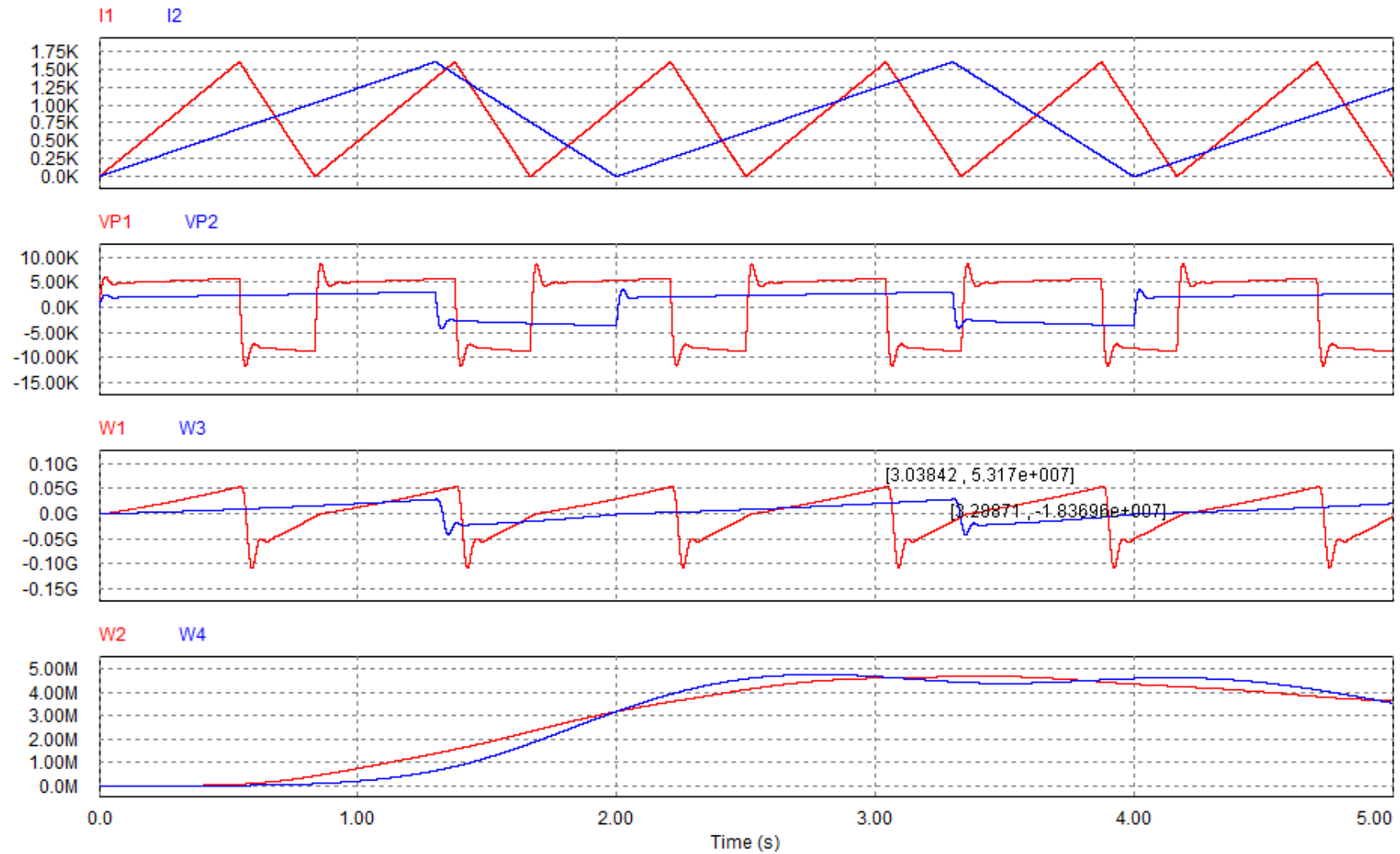
磁気エネルギー12.3MJ



立ち上げ時間－最大電力シミュレーション

コイル電流, 電圧, 電力, 平均電力

$I_1 = 0.55$ 秒立ち上げ, $I_2 = 1.2$ 秒立ち上げ



電力シミュレーションの結果

• 0.55秒立ち上げ

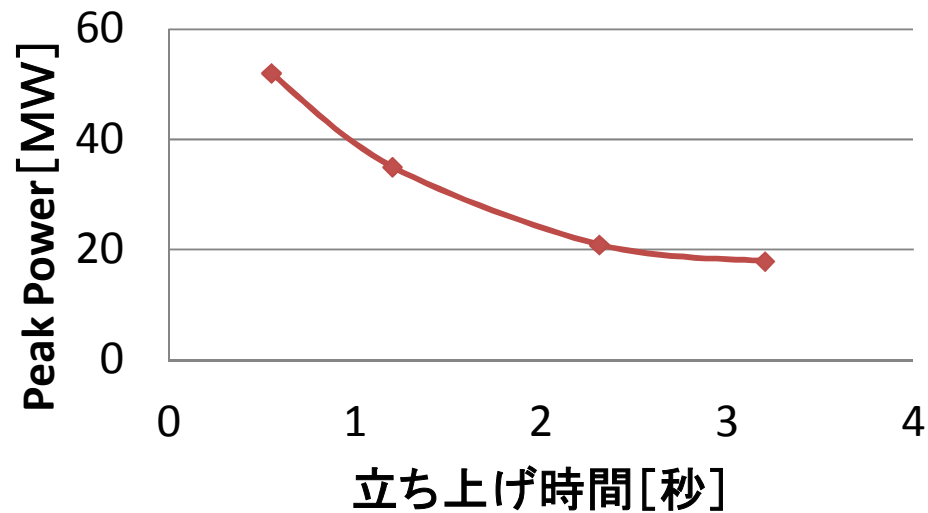
- 平均電力 3.6MW
- ピーク電力 +52.5MW -80MW
- 幅 133MW
- エネルギー $52.2\text{MW} \times 0.51\text{秒} \times 0.5$
- $= 13.31\text{MJ}$
- エネルギーは13.5MJで同じだが、表皮効果に注意が必要

• 1.2秒立ち上げ

- 平均電力 3.6MW
- ピーク電力 +35MW -25MW
- 幅 60MW
- エネルギー $30.7\text{MW} \times 0.9\text{秒} \times 0.5$
- $= 13.8\text{MJ}$

平均パワー 3.6MW
エネルギー 13.8MJ

必要なピーク電力



J-PARCなど加速器の磁気エネルギーは大きくはない(10MJ程度)が繰り返しが速い。

- エネルギーに比べて電力ピークパワーは50MWと大きい。平均電力はロス分のみで数MW程度のま

- 過渡変動の大きな負荷への新しい発想の電力システムが必要だ。

これはマイクログリッド, スマートグリッド, 船, 航空機など独立電力系の共通課題である。

- 加速器用磁場コイル電源の開発は,
新しい電力パルス応用電源の開発である。
パルス電力の応用は,
これから増えてくると思われる。

加速器負荷の特徴は 電力は＋－が大きいエネルギーは 大きくない。

- 電力ピークは50MW, エネルギー15MJは
コンデンサでも可能な大きさだが重大な欠点がある。
放電すると電圧が下がる問題。寿命の問題。
- これに対しフライホイール発電機は, 電圧は変わらず,
運転回数制限なし。
- 同期機を誘導電動機に代えたものを提案する。
- かご型誘導電動機は優れた性能を持っている。オー
バーパワー、脱調なし。誘導機は運転保守簡単, コスト
安い。
- フライホイール誘導電動機は並列接続が可能。

フライホイール付かご型誘導機を
ACバッテリー，キャッシュ・パワーと呼び，
前から東工大嶋田研究室では提案してきた。

- 風力発電機2MW機は約2.5億円(工場渡し)

PM同期発電機 6000万円から9000万円/2MW

AC/DC/ACフルコンバータは 約3000万円/2MW

かご型誘導電動機は 11kW機は7千円/kW

風力に誘導発電機を採用した例がある。(ジーメンスが5MW風力にかご型誘導機を採用している)

多数発電機を並列で構成すれば，7千円/kWとしても50MW分の誘導電動機は，

JT-60のフライホイール発電機は 5千円/kWだった。

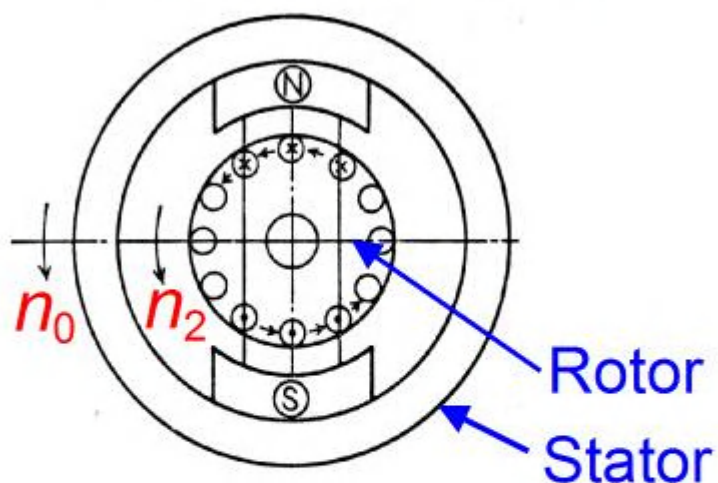
誘導機型小形フライホイールの開発

風力安定化のためのフライホイール
(10kW-30秒)
経済産業省の補助金で嶋田研究室
で製作
ヘリウム大気圧中
損失 300W を達成



誘導電動機は $\pm 3\%$ の周波数変化で電力を出し入れできる。

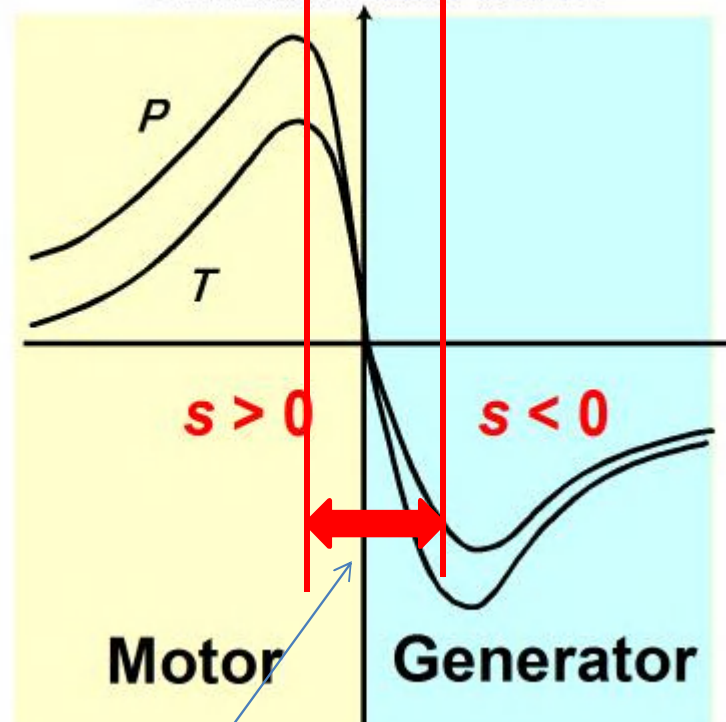
Induction Machine



n_0 : synchronous speed

n_2 : rotor speed
(= n_f : Flywheel rotation speed)

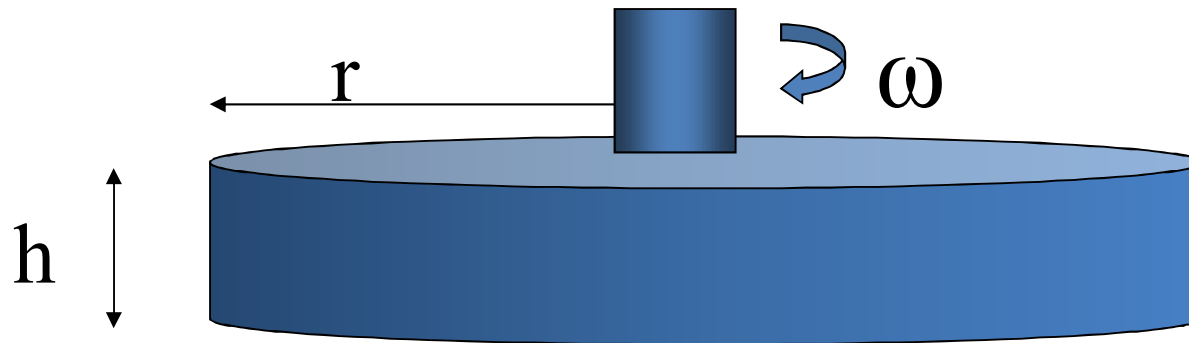
Torque-speed characteristic curve



この間で力行は3%, 回生は-3%の範囲で運転を行う

J-PARCの電力安定化に必要なフライホイールのエネルギー, これが2枚あれば十分

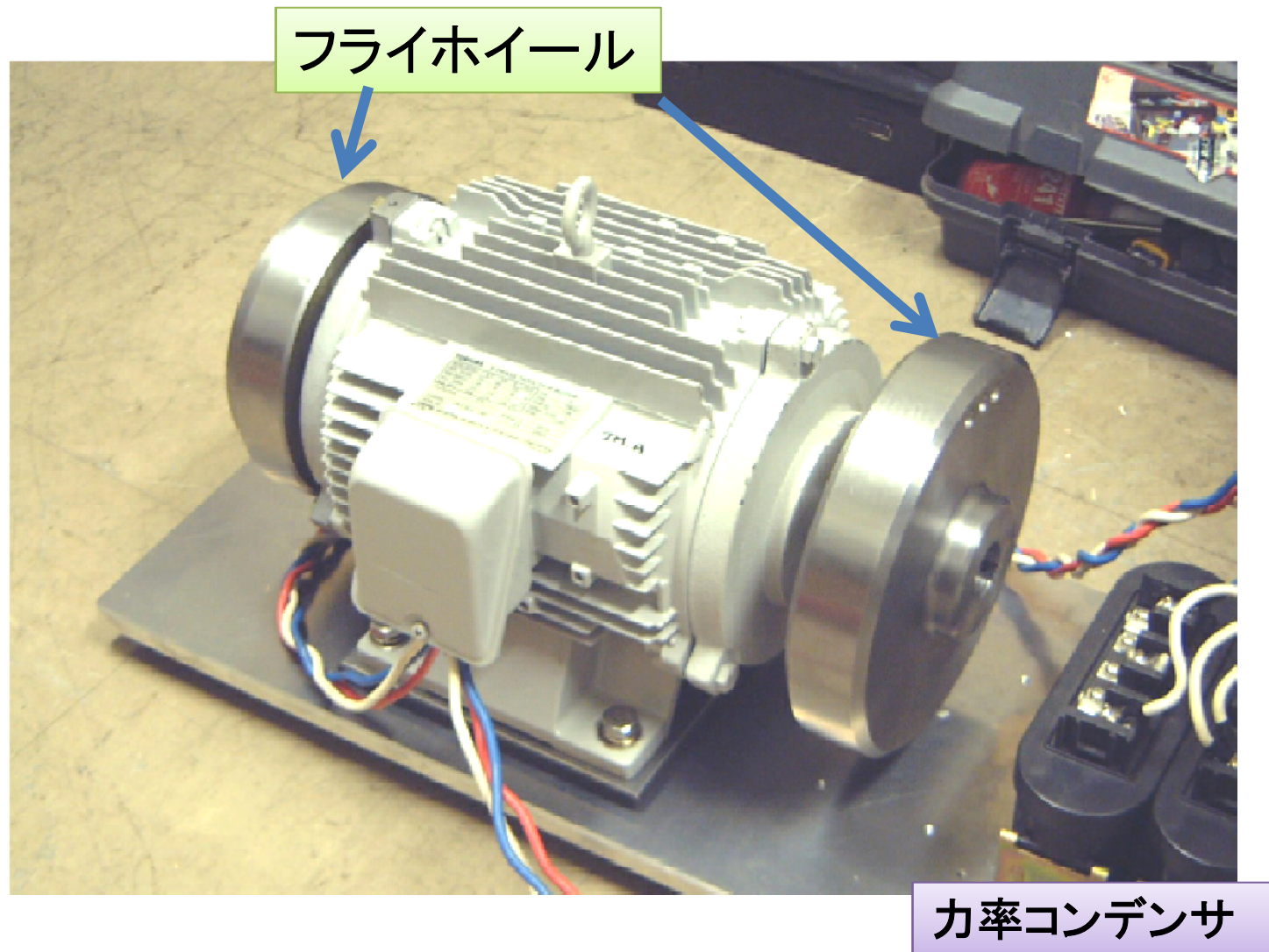
$$E = \pi \rho h \omega^2 \frac{r^4}{4}$$



厚さ0.1m, 直径2m, 材質: 鋼鉄, 回転数=1500rpm

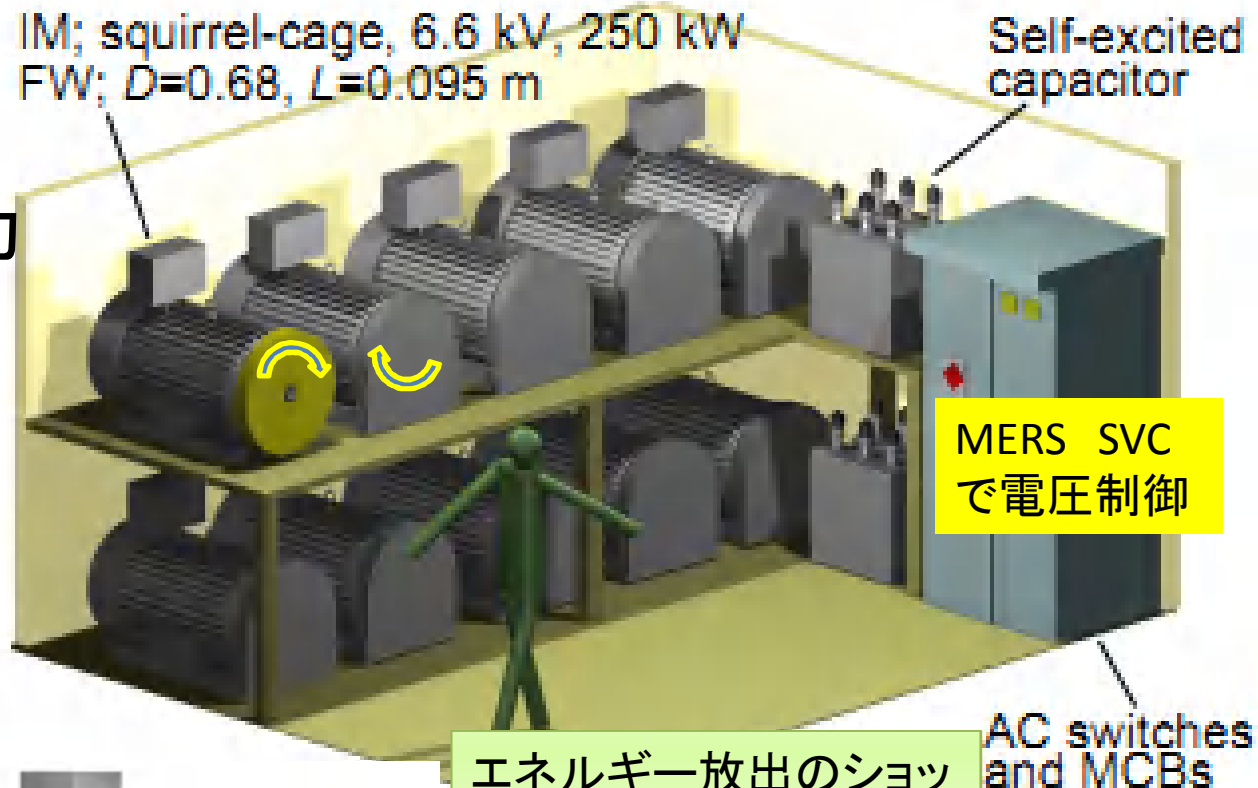
$$E = 15\text{MJ} = 4.1\text{kWh}$$

かご型誘導電動機にフライホイールはこんな感じ



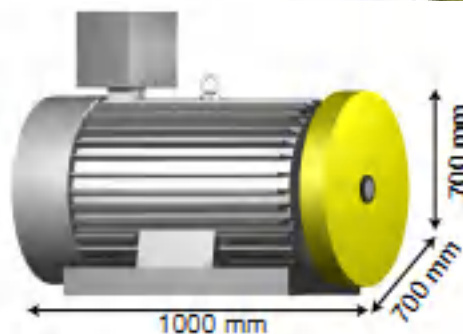
5MWのフライホイール誘導機電力バッファー (ACキャッシュパワー) 予想図

ACキャッシュパワー
電力の瞬時入出力
が可能, 電圧制御
は高速応答のSVC
MERSが適当。



specifications of 1 unit FW system

1 unit: 500 kW compensation
IM: 250 kW squirrel-cage
FW: stored 700 kJ
available 120 kJ
Size: $D=680$ mm
 $L=95$ mm



エネルギー放出のショックに対処するために, ステータの固定に注意。

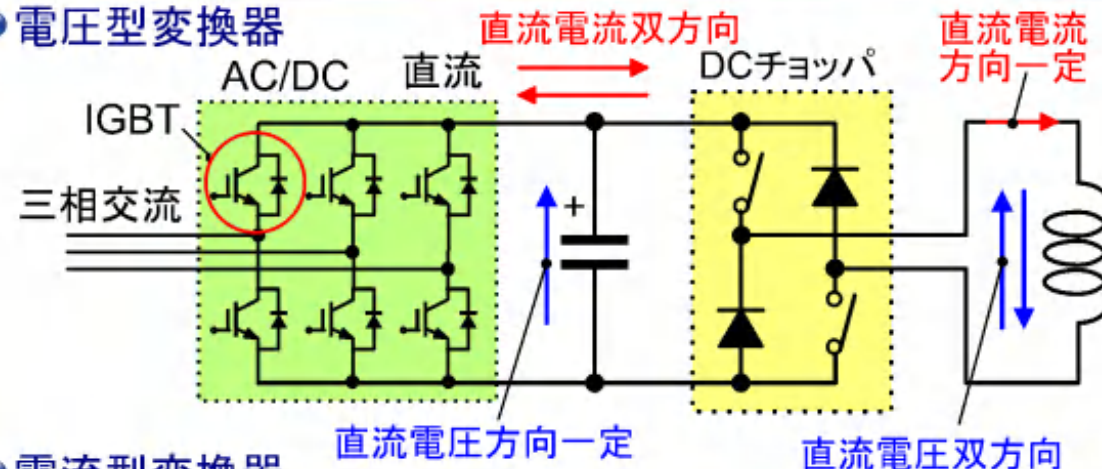
対策:
フライホイールの回転方向
を交互に逆にする

磁場コイルには電流型変換器が必要

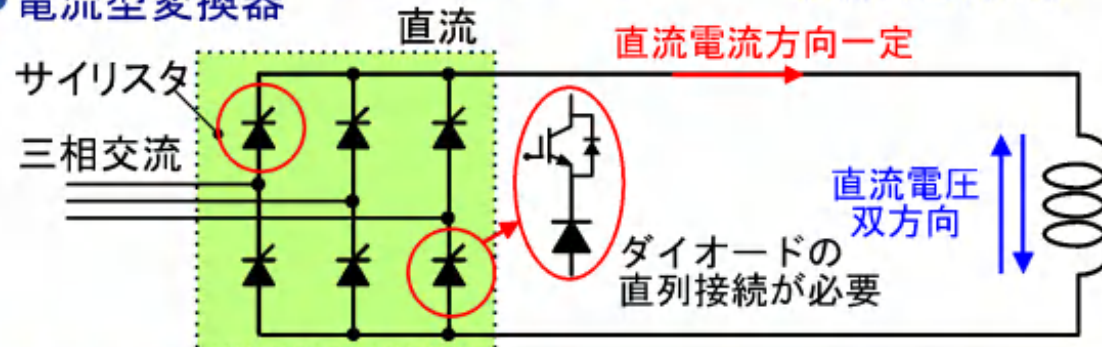
(明治大学野村先生より)

強磁場コイル用電力変換器の回路構成

●電圧型変換器



●電流型変換器



強磁場コイル用電源には電流型電力変換器の適用が望ましい

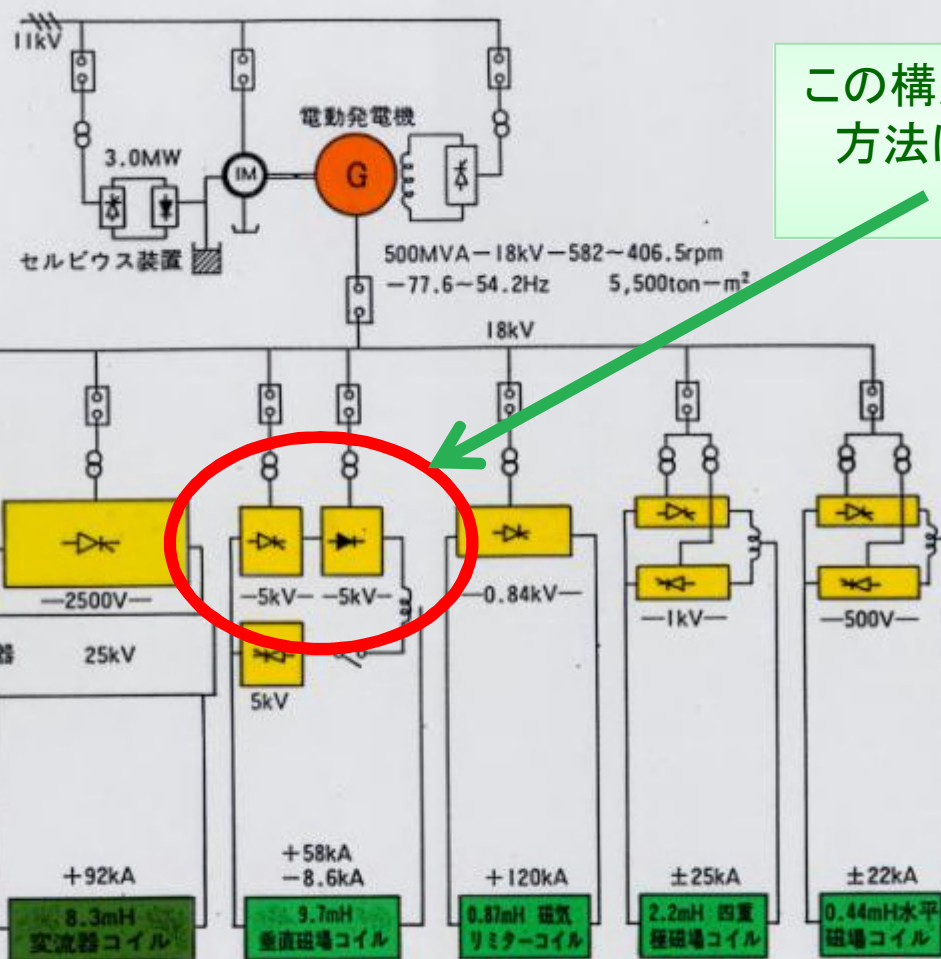
JT-60ポロイダル磁界コイル電源・総容量1GW

プラズマの電流, 位置形状の制御を行う電源群

3MWのセル
ビウスで駆動
される500M
W発電機

この構成が今, 直流送電
方法になって 重要に
なってくる。

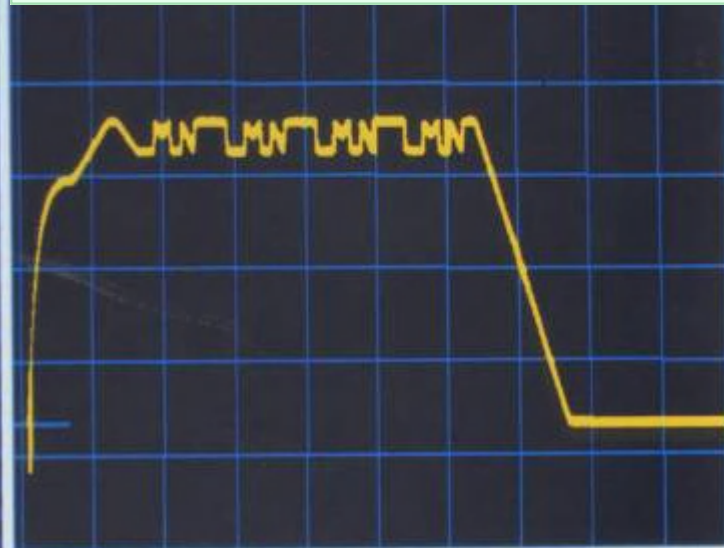
直流遮断
機と直列
にサイリス
タ変換器



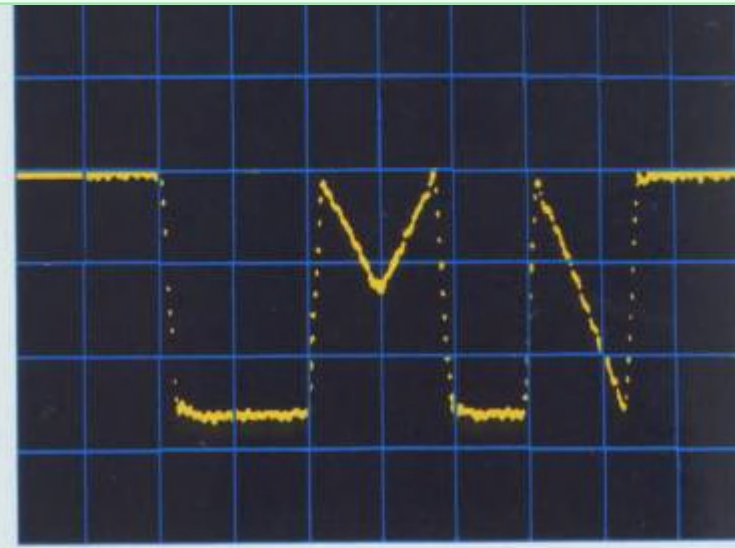
ポロイダル磁場コイル電源構成図

サイリスタ変換器の電流制御

電流型電力変換はソフトスイッチング、高効率で、大容量にむく。下図は電流50kA・電圧±2.5kV、125MWのサイリスタ変換器で文字が書ける。



15kA/div 396.7ms/div



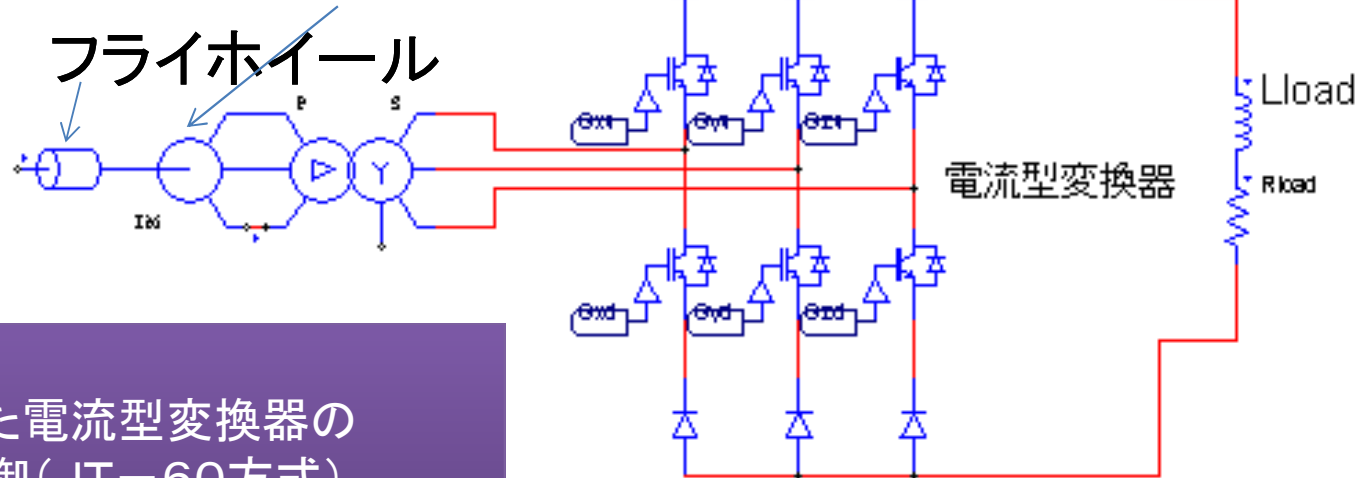
1.875kA/div 49.5ms/div

25年間半導体スイッチ(サイリスタ)が1つも壊れなかった。電気学会「電気の礎賞」受賞2010年

フライホイール発電機と 電流型変換器の結合

産業用, 核融合用で
多くに実績あり

- 誘導または同期発電機
- フライホイール



20年前の実績
サイリスタを使った電流型変換器の
最短時間応答制御(JT-60方式)
J-PARCではロスレススナバ方式のPWM
制御の電流型変換器が作られた。

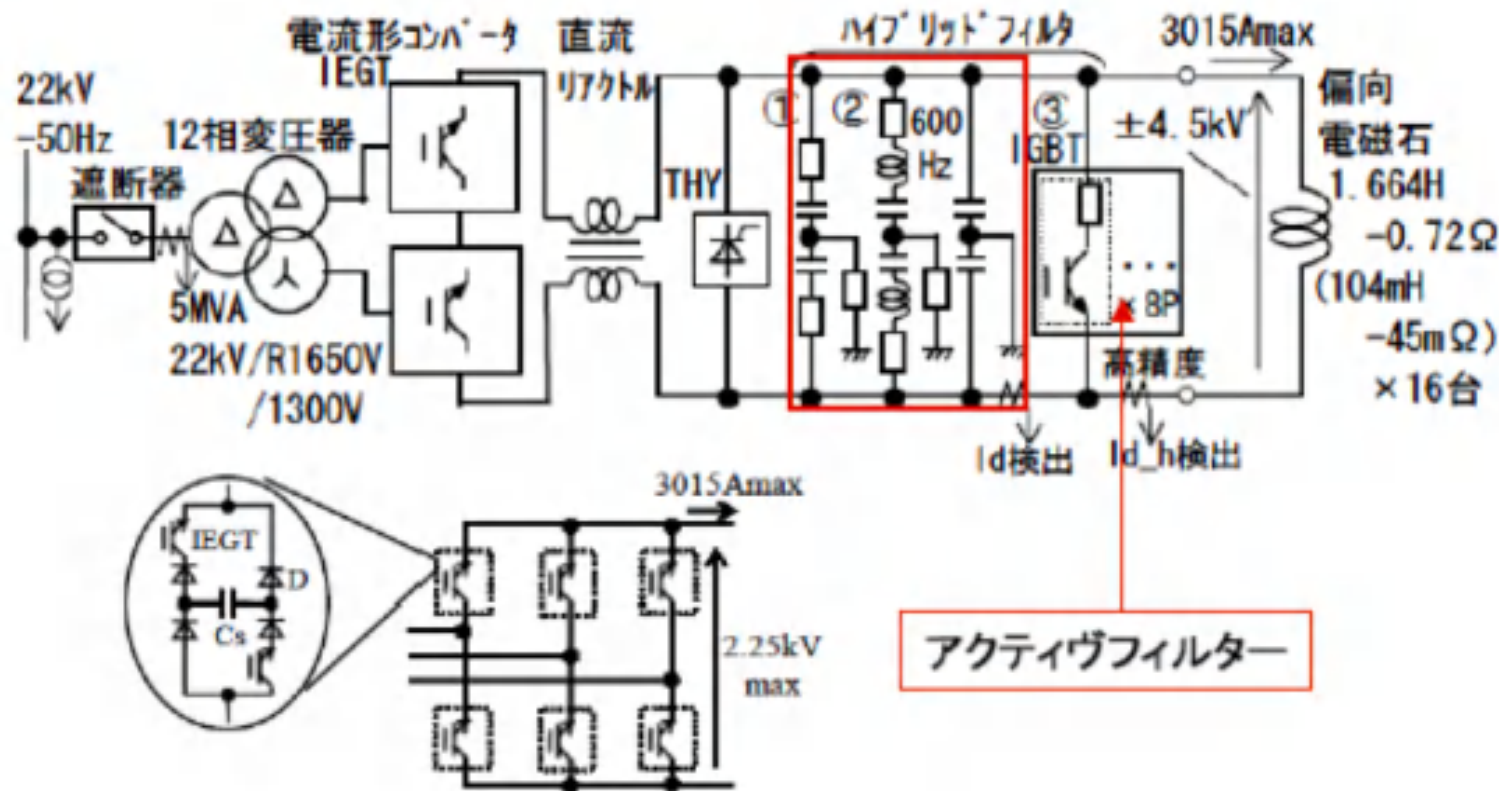
電圧リップルや制御ス
ピードが遅いのが欠点

JT-60時に無かった新技術……
力率1運転で電力可逆運転, 半導
体デバイスでは逆阻止IGBTがあ
る(RB-IGBT)

J-PARCの現電源は系統直接受電ではあるが、最先端の逆阻止スイッチ・ロスレススナバを使ったPWM制御の電流型変換器である。

現行電源回路構成

30GeVでは1.6kA。
この電源が6セット



新電源（高速立ち上げと高精度化） 提案の要点

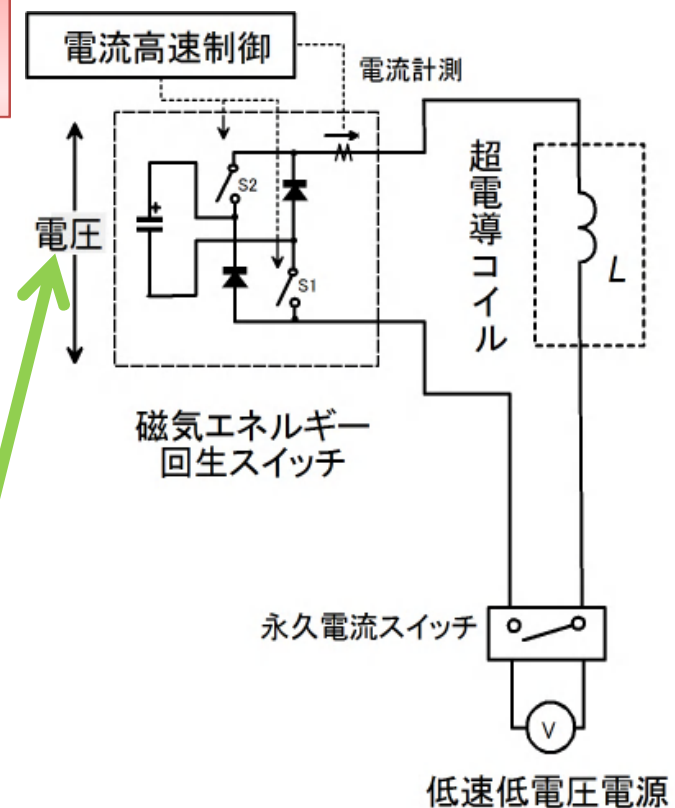
- 現行電源を生かして、電圧出力のみ増強
– これまでの知見を引き継ぐことができる。
- 磁気エネルギー回生電源で制御用電圧発生。
- 受電点電力変動の問題をフライホイールで解決。
- ピーク50MWでも受電電力は3.6MWに低減する。大幅な電力料金削減。
- 電流型変換器のタフな所を生かす。（短絡事故で問題なし）

コンデンサバンクがエネルギーを放出して電圧が低下する問題, **解決策はエネルギーの移送を行う**

磁気エネルギーを回生するパルス電源

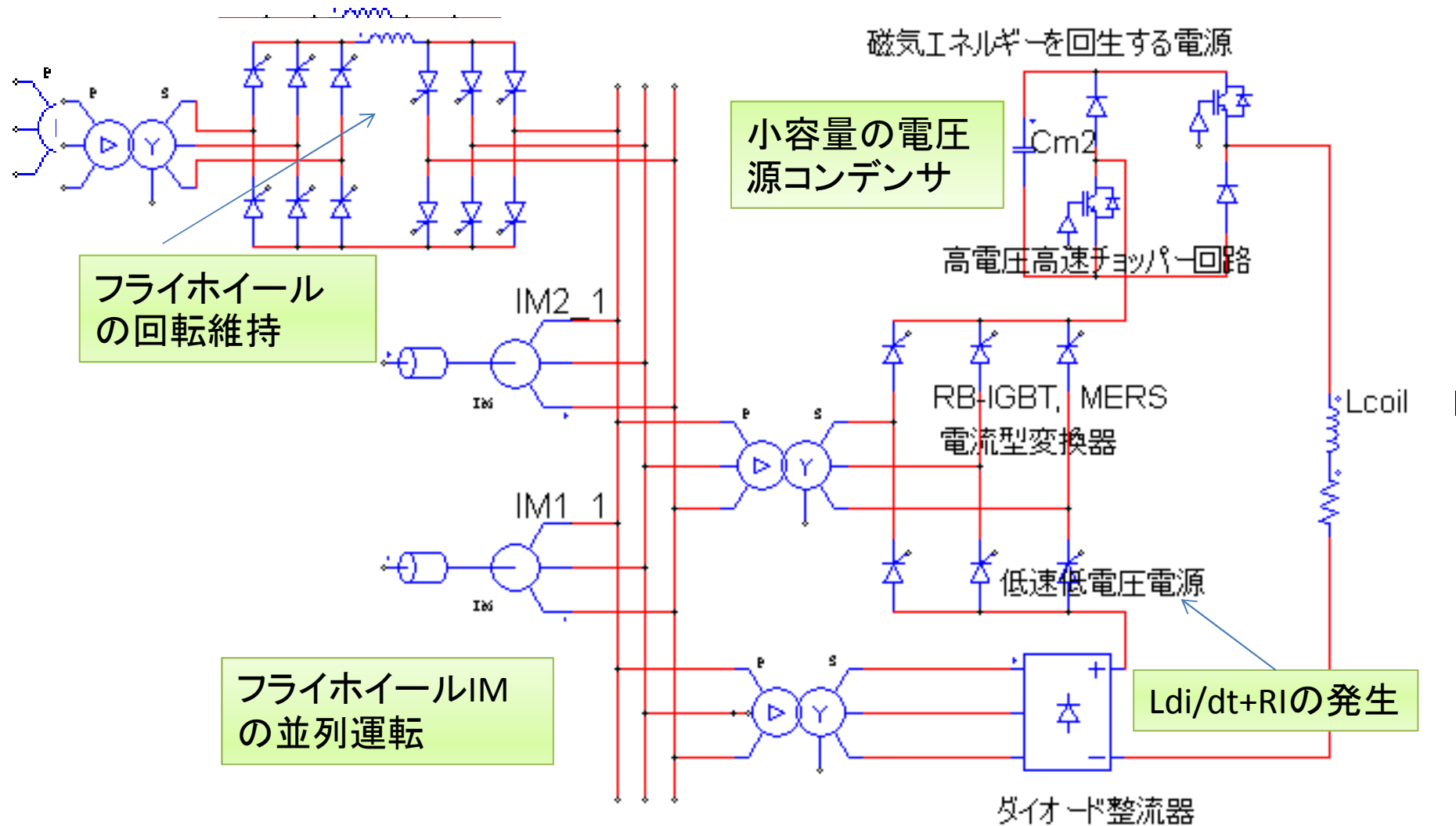
磁気エネルギーを回生する磁場コイル電源の基本アイデアである。

- チョッパはコイル電流とコンデンサ電圧とを可逆に変換するMERS回路
- 高速チョッパはコイル電流の制御を行う。
- コンデンサ電圧の制御は低速電源が行う。



KEKのフライホイール電力システム案

磁気エネルギーを回生する磁場コイル電源+電流型変換器+フライホイール誘導発電機



結論

誘導電動機フライホイールは、もはや、電力貯蔵装置では無い。電力パルスの平準化装置。

誘導電動機を使ったフライホイールは
AC電力の蓄電池、
ACキャシュ・パワーである。

誘導機は並列運転が可能なので必要な電力に応じて運転停止。

1. 加速器磁界制御用の電圧は、磁気エネルギーを回生することで得て、必要なだけ発生させて、高精度なコイル電源となる。
2. 低速大容量電源と高速小容量電源と役割を分ける。
3. 低速電源は必要なエネルギーをもつフライホイール電源で、一般産業用でよい。現行電源を改良する。
4. さらに高速立ち上げが必要な場合、ダイオード電源を追加する。