

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)

KEK 加速器研究施設

佐藤 皓

2013年8月5日 第10回加速器学会@名古屋大学

加速器が発明される前

1919年Rutherfordによる α 線を用いての最初の
原子核崩壊実験



この実験により現在の原子構造の基礎が確立された。

ラザフォードの技巧の退屈さが多くの有能な核物理学者を遠ざけていた。もし、原子核粒子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。

(アルバレの感想:原子爆弾の誕生(R. ローズ著)紀伊国屋書店)

1930年代初頭になって、現在の加速器のもととなる、

サイクロトロン(ローレンス)

静電圧加速器(コッククロフトとウォルトン)

リニアック(線形加速器)(スローン)

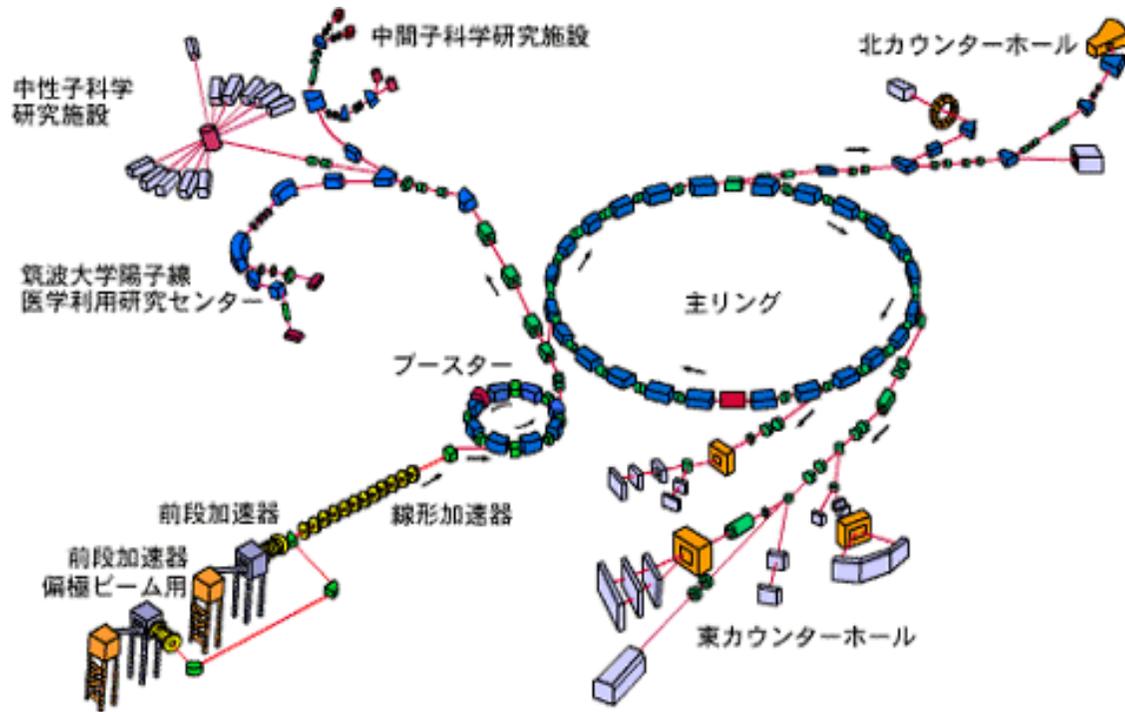
の発明ラッシュが起きる。

そして、

1932年コッククロフト静電加速器による原子核の人工変換



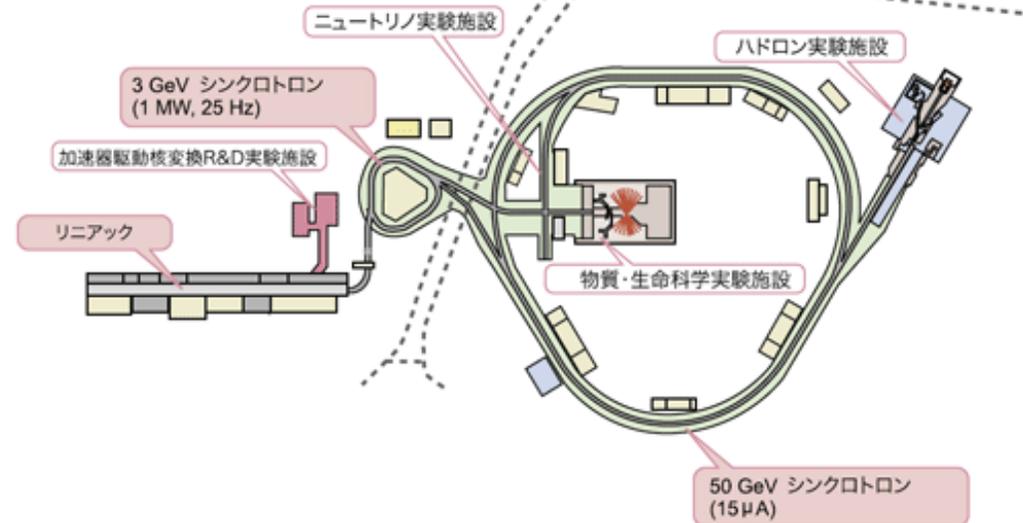
それから80年余、、、



J-PARC (2008年稼動)

太平洋

12GeV-PS (2006年シャットダウン)



12GeV-PS (2006年シャットダウン) の場合の電力

偏向電磁石48台1式と収束用電磁石28台2式

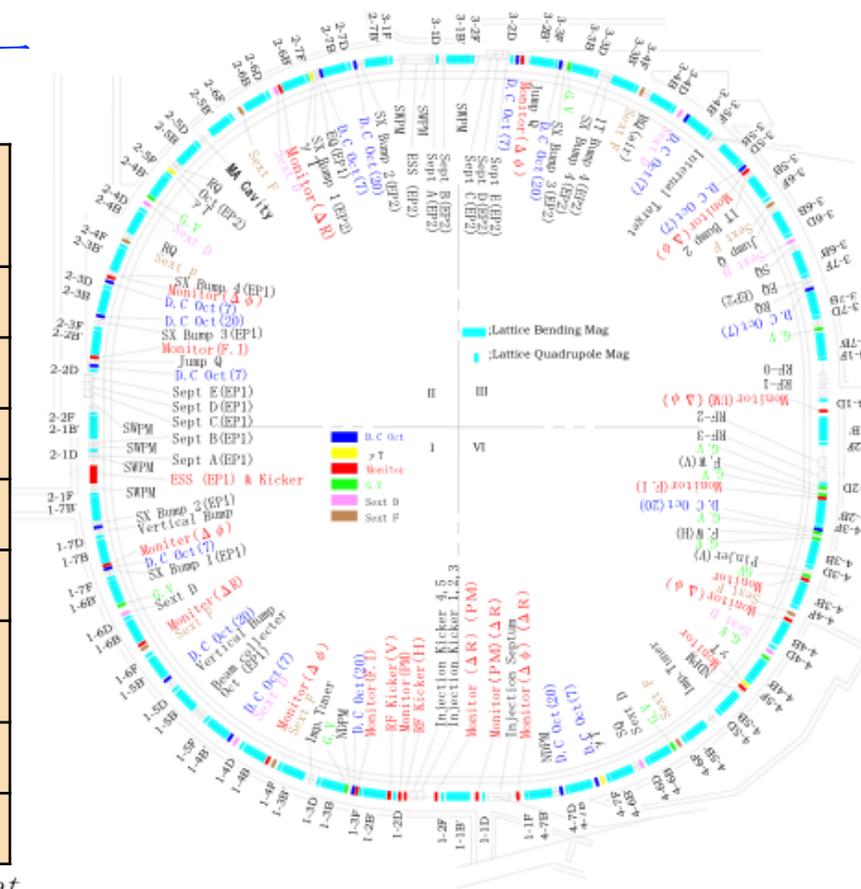
3式の総電力: **23.6 MVA**

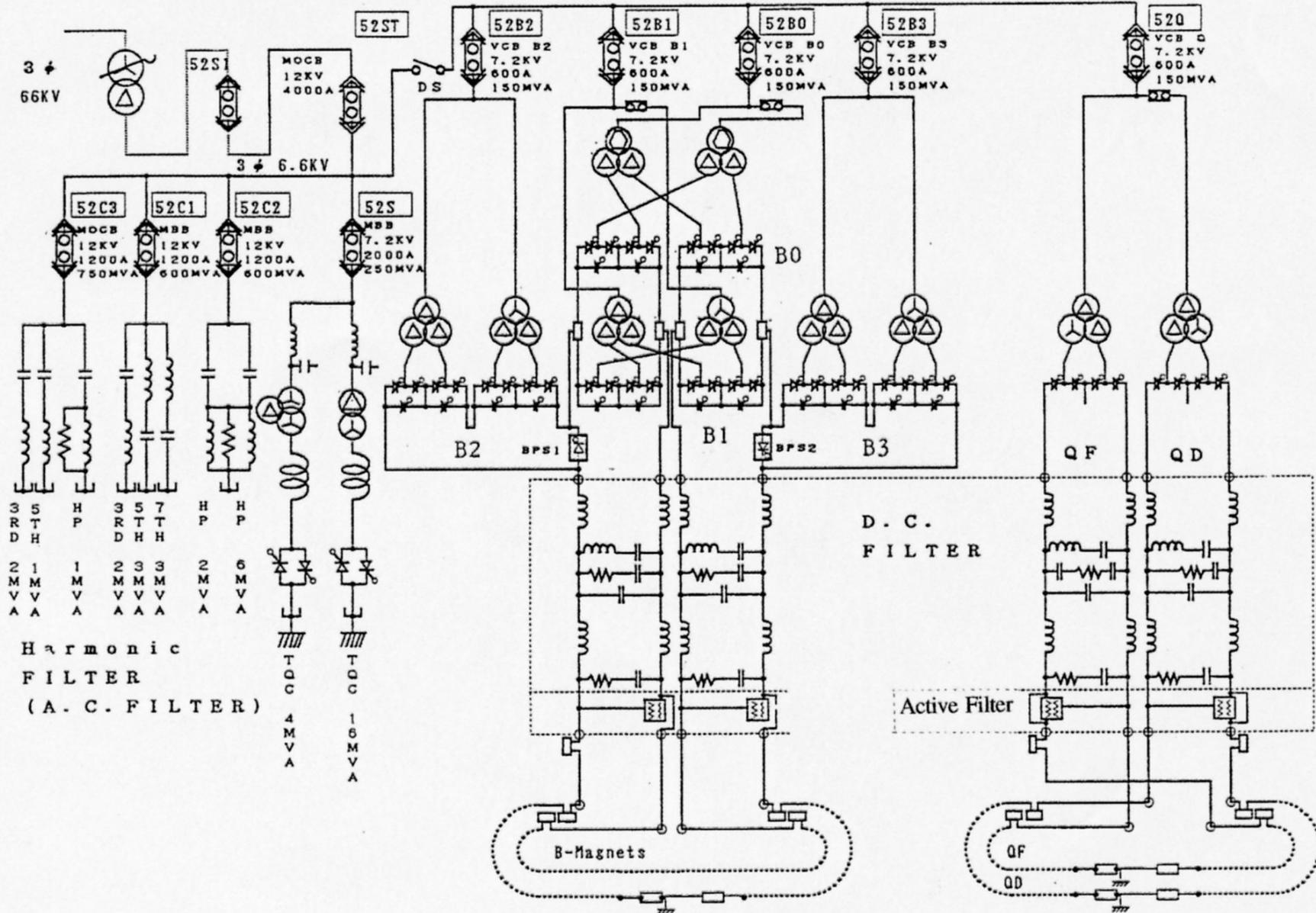
無効電力: 20 MVA_r

高調波フィルター: 20 MVA_r

12GeV-PS主リング電磁石の負荷パラメーター

	Bending Magnets	Quadrupole Magnets
Resistance	0.75Ω	0.32Ω
Inductance (at Injection)	1.1H	0.12H
Time Constant of Load	1.5s	0.38s
Injection Current	200A	110A
Flat Top Current	2850A	1600A
Acceleration Time	790ms	790ms
L (dI/dt)	3400V	210V
R × I (at Flat Top)	2100V	510V





KEK-12GeV PS main ring power supply

Stabilization and Ripple compensation of the main ring power supply

for AC line: Harmonic filter
Reactive power compensator

for DC line: AVR
ACR
Repetitive Control of Current Deviation
APPS tuning
DC low pass filter
DC active filter

Very high accuracy tracking and stability (10^{-4}) was achieved using several control systems complex, especially using a repetitive control method, in spite of pulse operating high power supply with high inductance load. Ripple is reduced by filter systems and APPS tuning. (10^{-5} - 10^{-6})

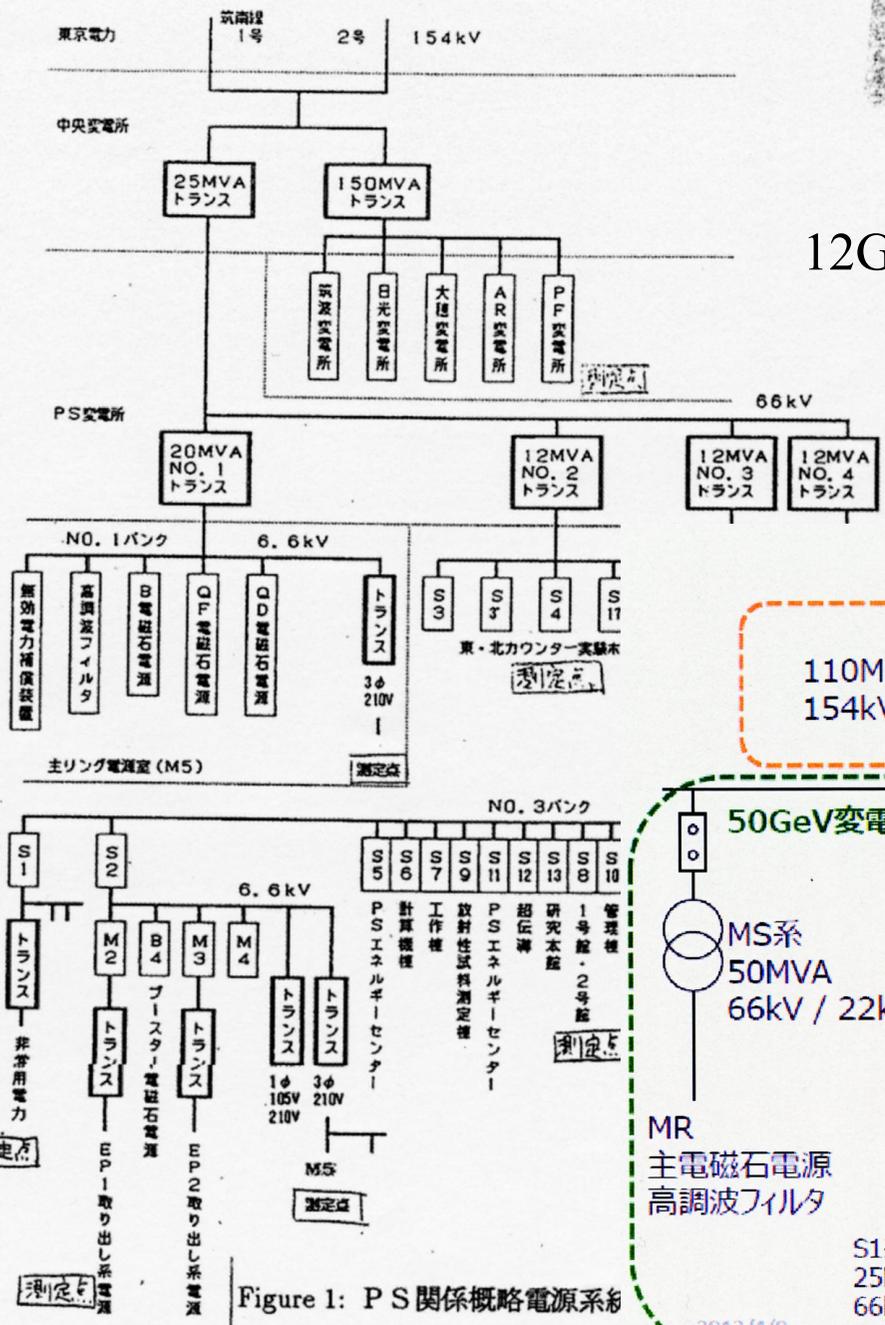
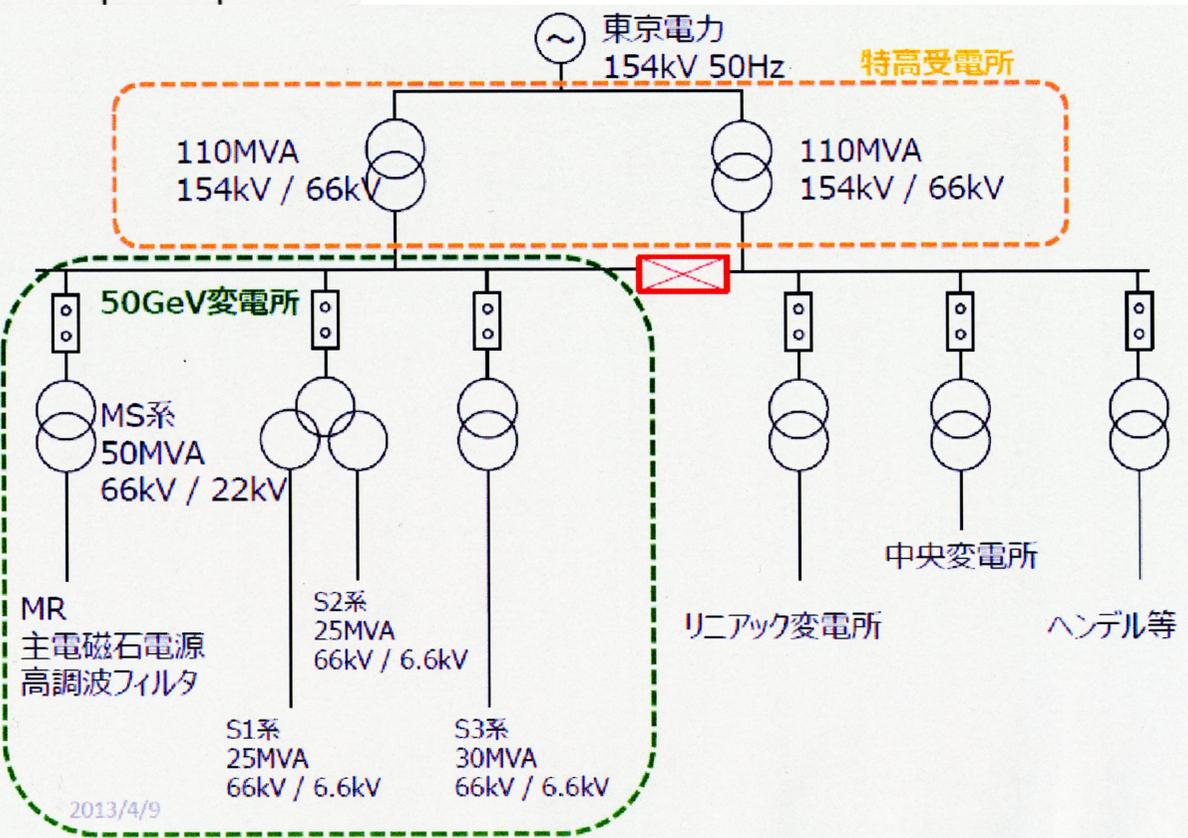


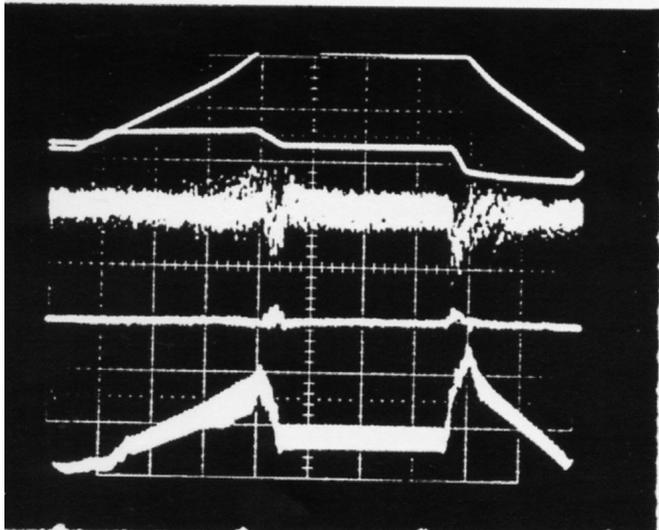
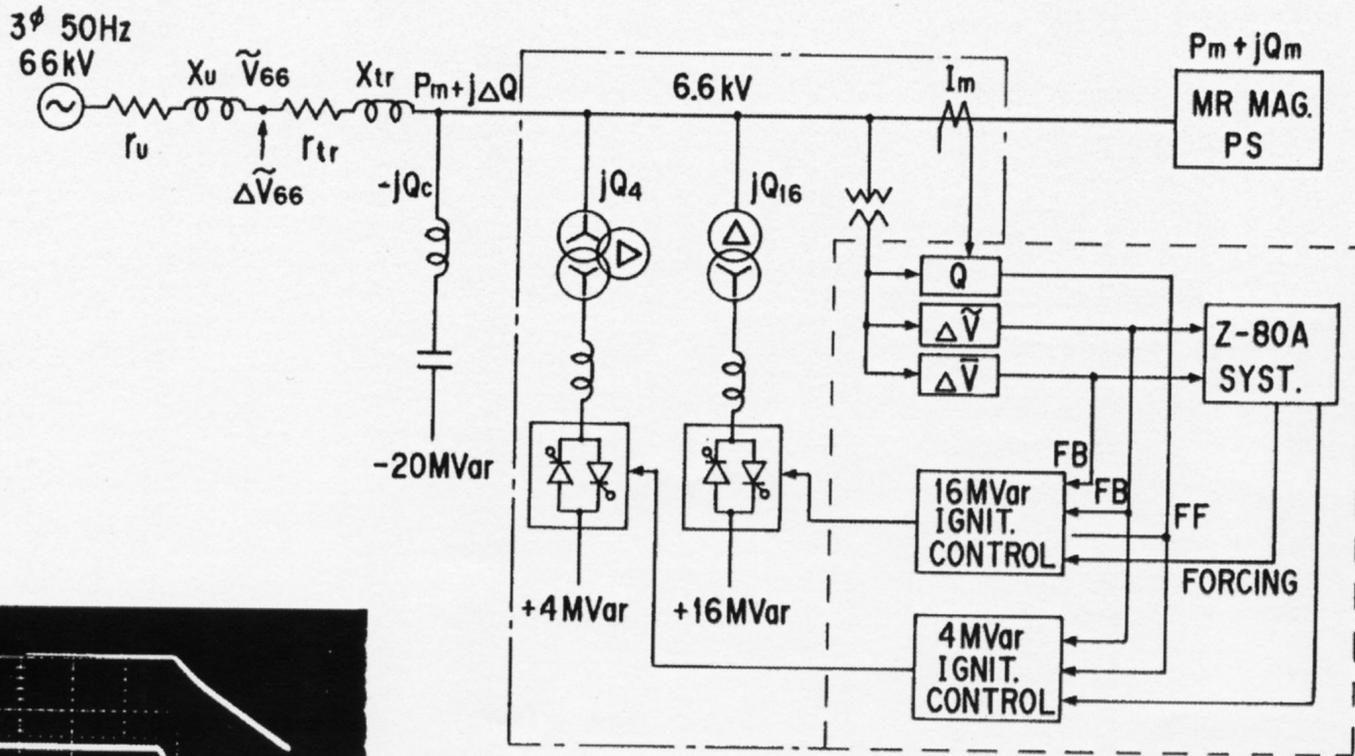
Figure 1: PS関係概略電源系統

12GeV-PS受電系統図

J-PARC受電系統図 (中村衆氏)



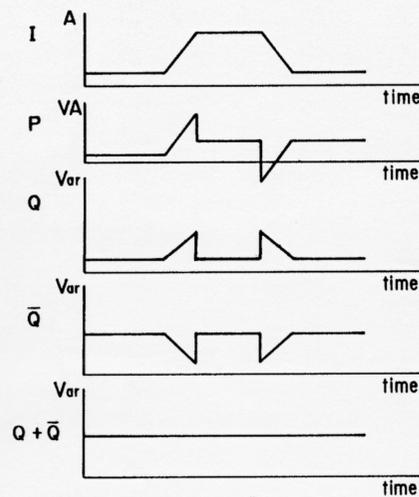
2013/4/9



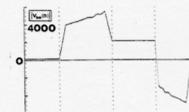
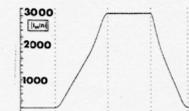
Current
Voltage
 $\Delta V @ 6.6kV$
 $\Delta V @ 66kV$
Q

12GeV-PSの場合

Peak 20MW, Av.8MW 無効電力補償



$$V = L \cdot di/dt + IR$$

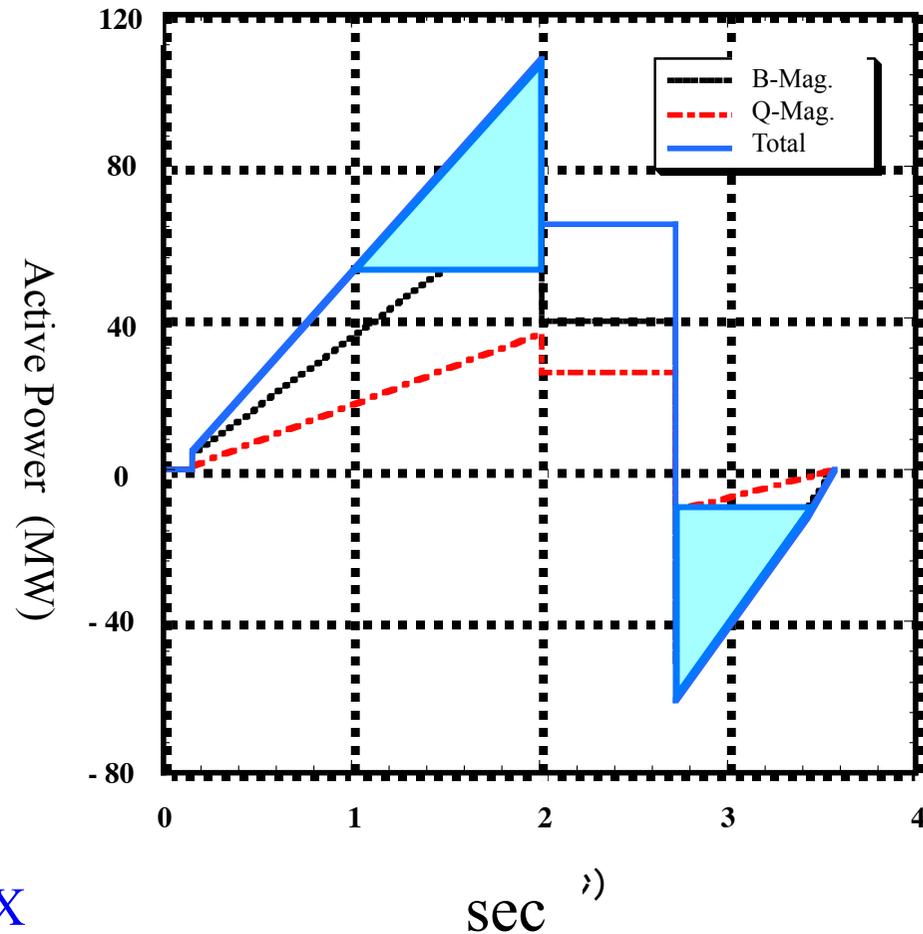


$$\Delta V = \Delta Q \cdot x + \Delta P \cdot r$$

$$\cong \Delta Q \cdot x$$

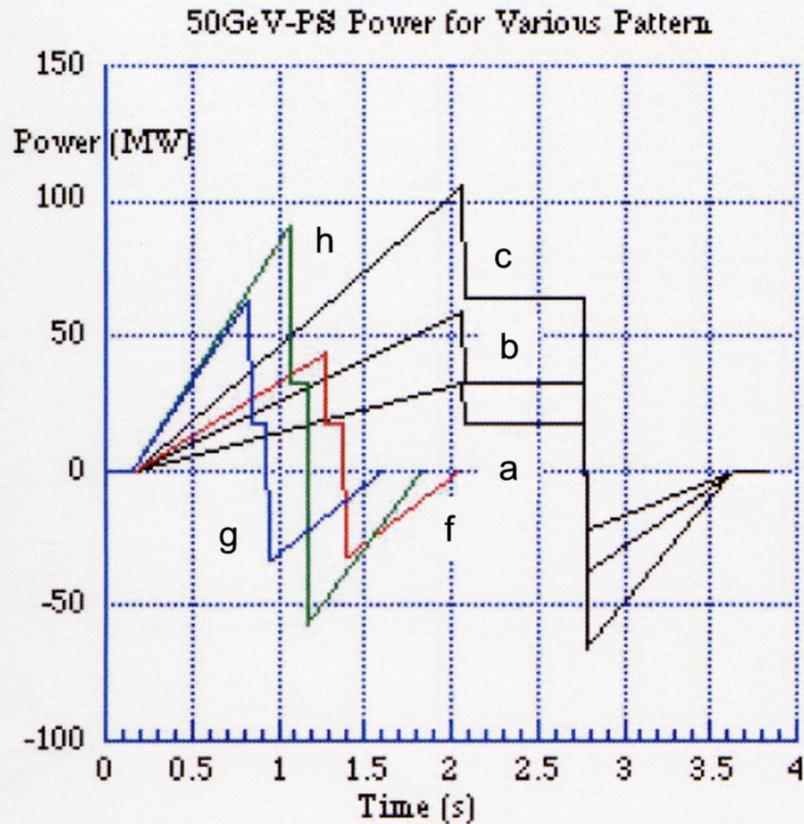
50 GeV – MR Required Power

- Peak Power 110 MW, - 60 MW
- Amplitude **170 MW**
- Repetition 3.42 sec
- Operation Cycle $\sim 10^8$ cycles (20Years)
- Compensated Power
 $P \sim 55 \text{ MW} \times 1 \text{ sec} / 2 \sim 30 \text{ MJ}$
- AC Loss Considered
 $1/2 \sim 1/3$ power will discharge
 $E \sim 60 \sim 100 \text{ MJ}$



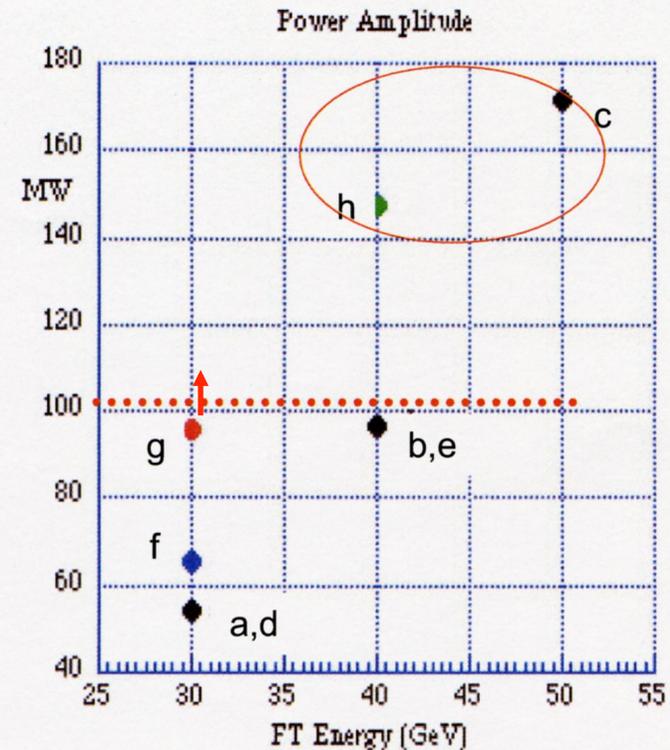
$$\Delta V = \Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X$$

50 GeV-PS電源電力



電力波形

100 MWを越えると系統に
許容以上の影響が出る



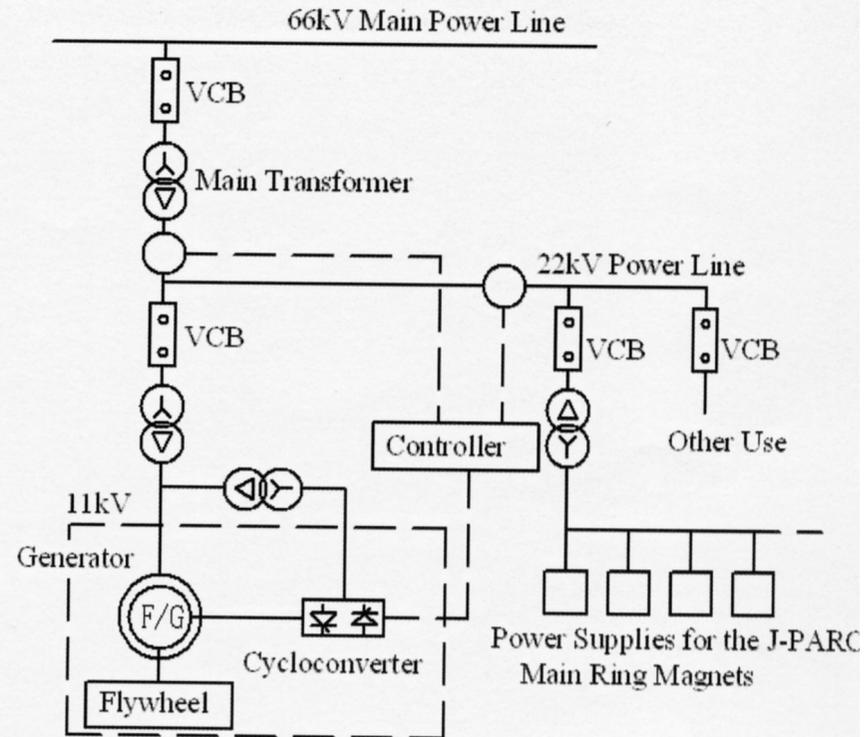
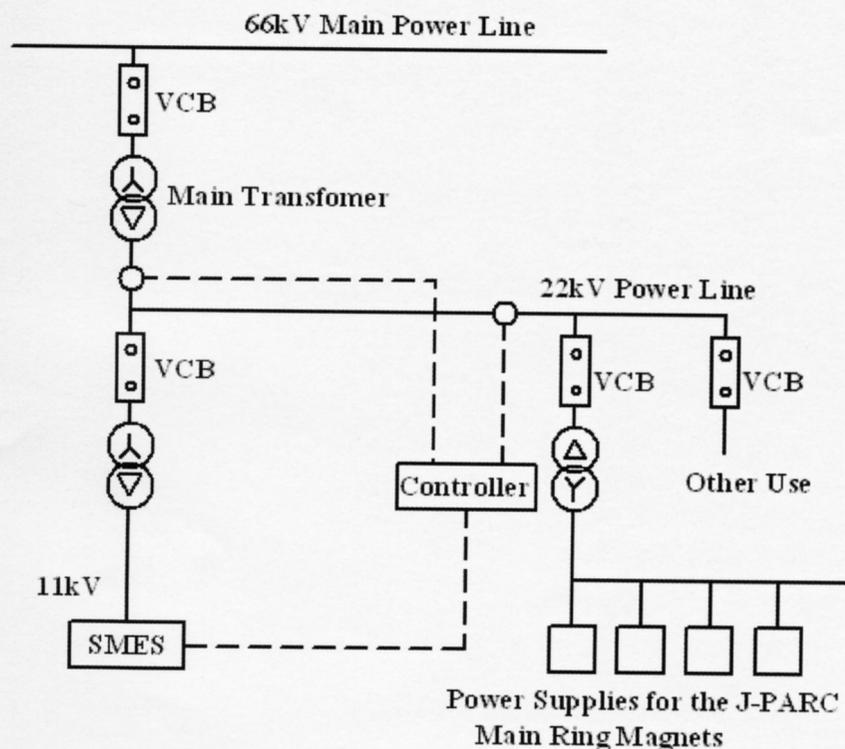
電力振幅

a:30GeV, b:40GeV, c:50GeV、f:30GeV-2秒周期、g:30GeV-1.6秒周期→1秒周期
h:40GeV-1.8秒周期、d,e:a,bとFTのみ短く他同じ

50 GeV-PS 電源電力変動補償

• 交流側接続方式

フライホイール、
SMES



Fly Wheel
(JHF Original)

負荷変動補償実証試験@古河日光発電所

超電導コイル

●超電導コイルの主要諸元

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



20MJ SMES

DCリアクトル

直流遮断器

計測装置



高調波フィルタ

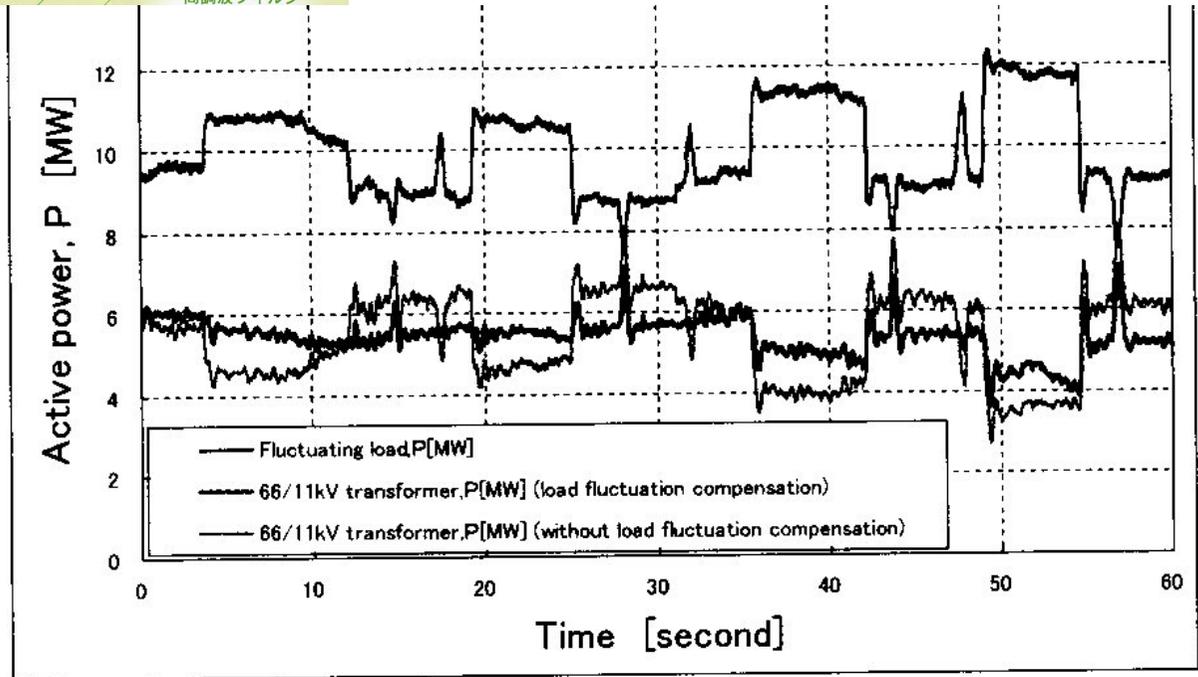
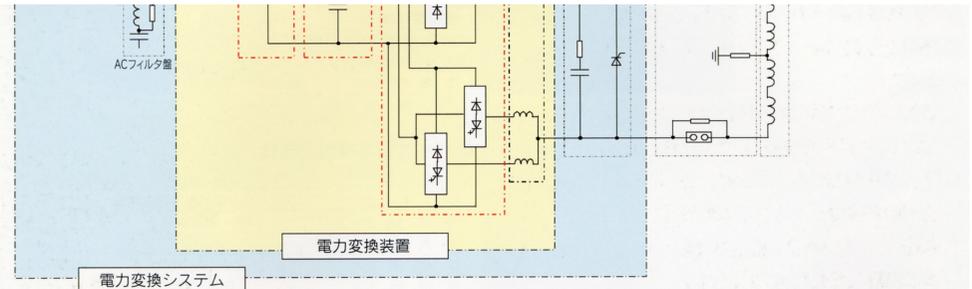


Fig.3 Load fluctuation compensation of the SMES



中部電力



●電力系統制御用SMES主要諸元

電力変換装置	設備容量	1万kVA
	使用素子	GCT(6kV-6kA)

超電導コイル	蓄積エネルギー	19 MJ
	導体種別	金属系(NbTi)
	運転温度	4.2 K
	運転電流	1,350 A
	運転電圧	1.1 kV
	最大磁界	4.4 T

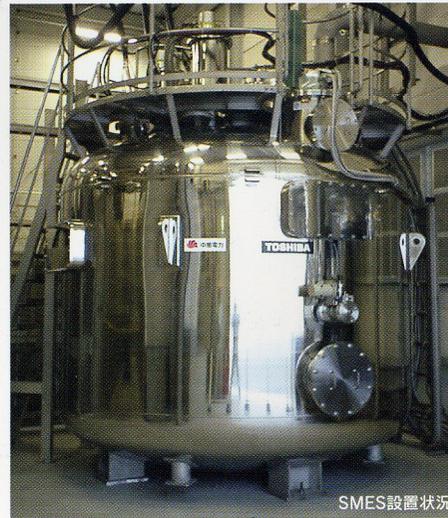
◎超電導技術を用いた瞬時電圧低下補償装置(SMES)

[電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する効率的なシステム]

超電導技術を用いて電気エネルギーを貯蔵する超電導電力貯蔵装置(SMES)を国内最新鋭液晶工場(シャープ株式会社亀山工場殿)に設置し、雷などによる瞬時電圧低下(瞬低)の被害から重要負荷を一括して補償するフィールド実験を平成15年7月より実施しています。平成17年10月からは、世界最大規模となる出力10MVAのSMESによる試験を進めています。

瞬低補償SMESの特徴

- 工場一括の瞬低補償が可能な大出力
- 待機損失低減を図るための回路構成の採用
(常時商用給電方式、充電専用回路)
- システムの簡素化
- メンテナンス性の向上
(小型冷凍機組合わせによるコイル冷却の実現)

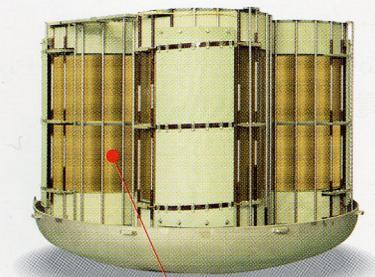


◎瞬低補償SMESシステムの概要

●コイル主要諸元

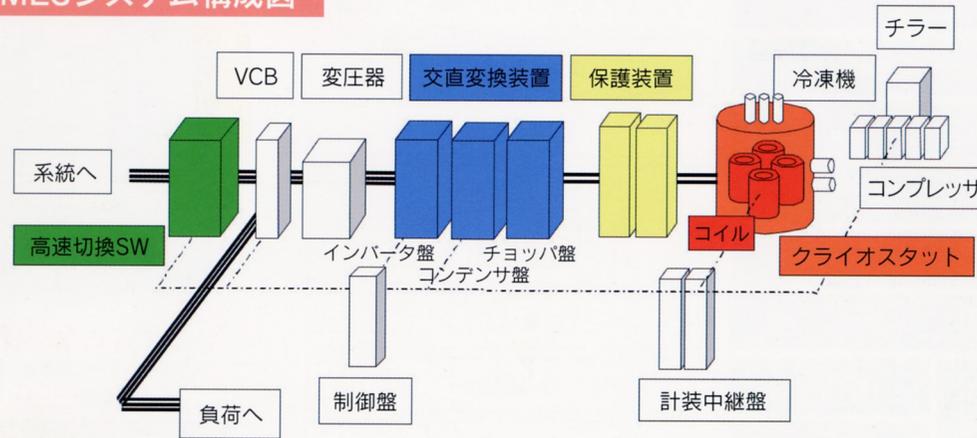
コイル形状・配置	ソレノイドコイル 4ポール配置	
定格電流	直流 1,400A	
定格電圧	直流 6.6kV	
インダクタンス	21.1H	
貯蔵エネルギー	20.7MJ	
最大磁場	4.4T	
コイル形状	外半径	0.469m
	高さ	外径:0.94m/高さ:1.53m

●超電導コイル



中部電力

SMESシステム構成図



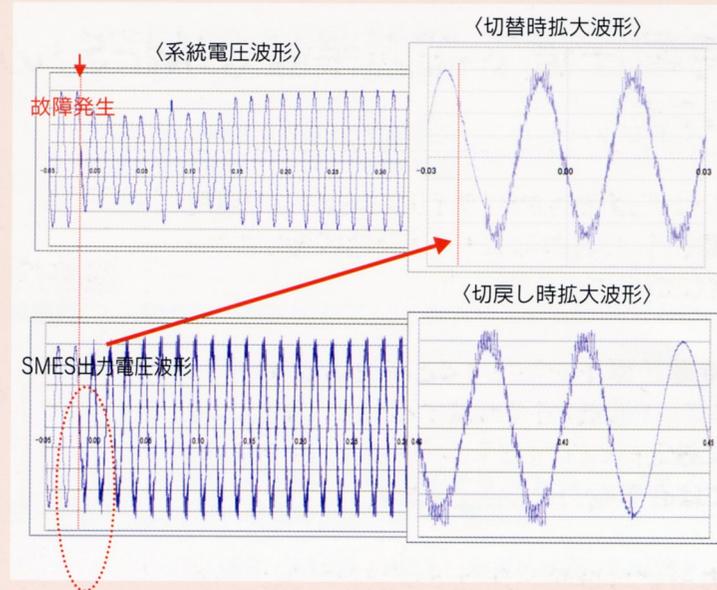
●10MVA-10MJ 瞬低補償SMES基本諸元

定格出力	10MVA
出力時間	1秒以下
接続方法	常時商用給電方式
受電電圧	6.6kV 3Φ
切替時間	1/2サイクル以下
電圧確立時間	1サイクル以内

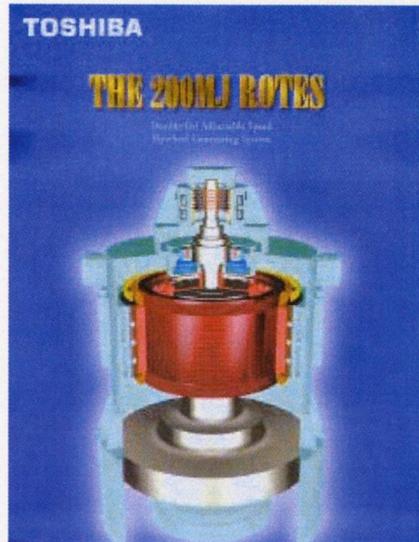
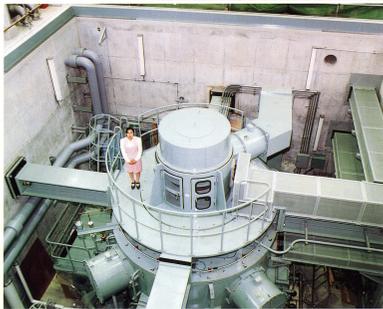
●SMESシステムによる瞬低補償実動作結果

発生日時: 2004年9月24日 19:55

故障様相: 多重雷による77kV送電線故障(2回線2ΦG→故障除去→1回線2ΦG)



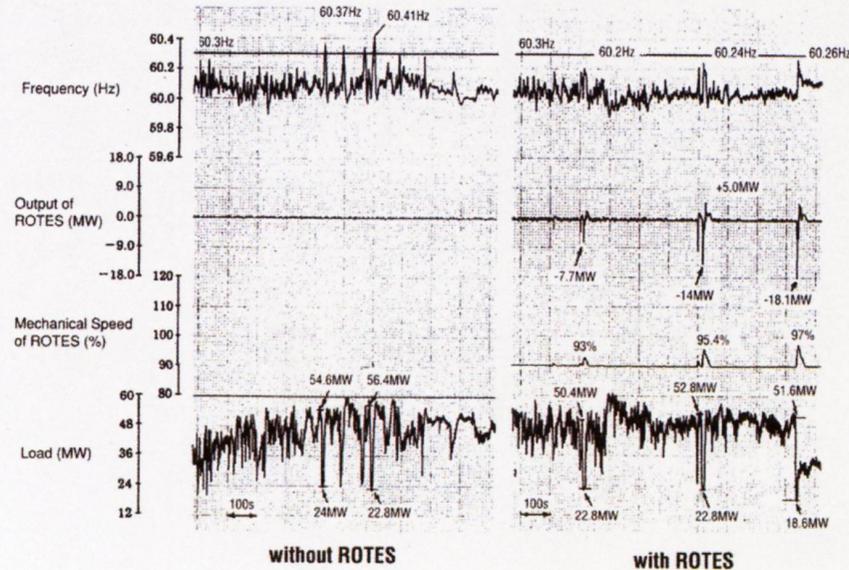
沖縄電力 ROTES



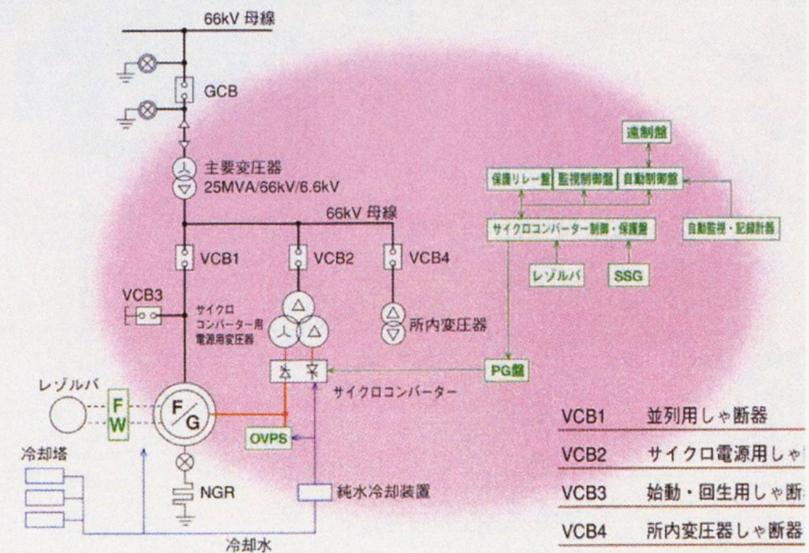
Verification in Commercial Operation



▲中城湾変電所 ROTES設備全景



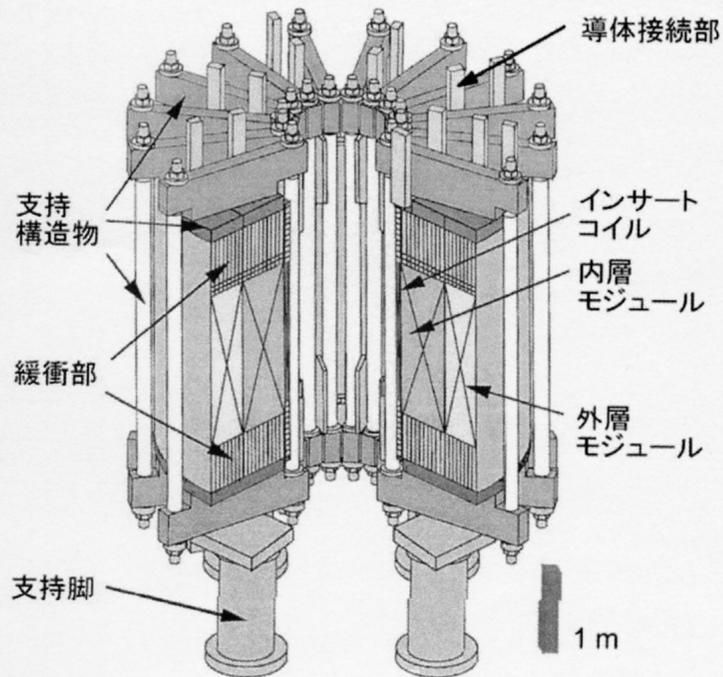
[単線結線図]



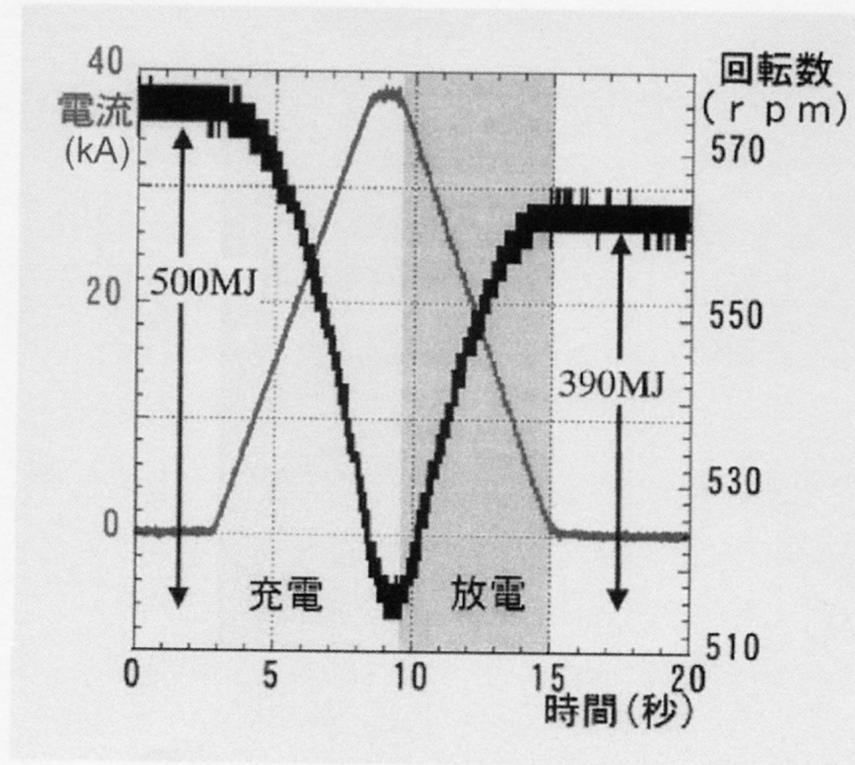
大電力エネルギー転送の実験

ITER計画の工学設計活動の一環として開発されたCSモデルコイルとJT-60用フライホイール発電機との間で450MJを12秒で往復

ITER-CSモデルコイル概観



「核融合炉をめざして」日本原子力研究所1997年版より引用

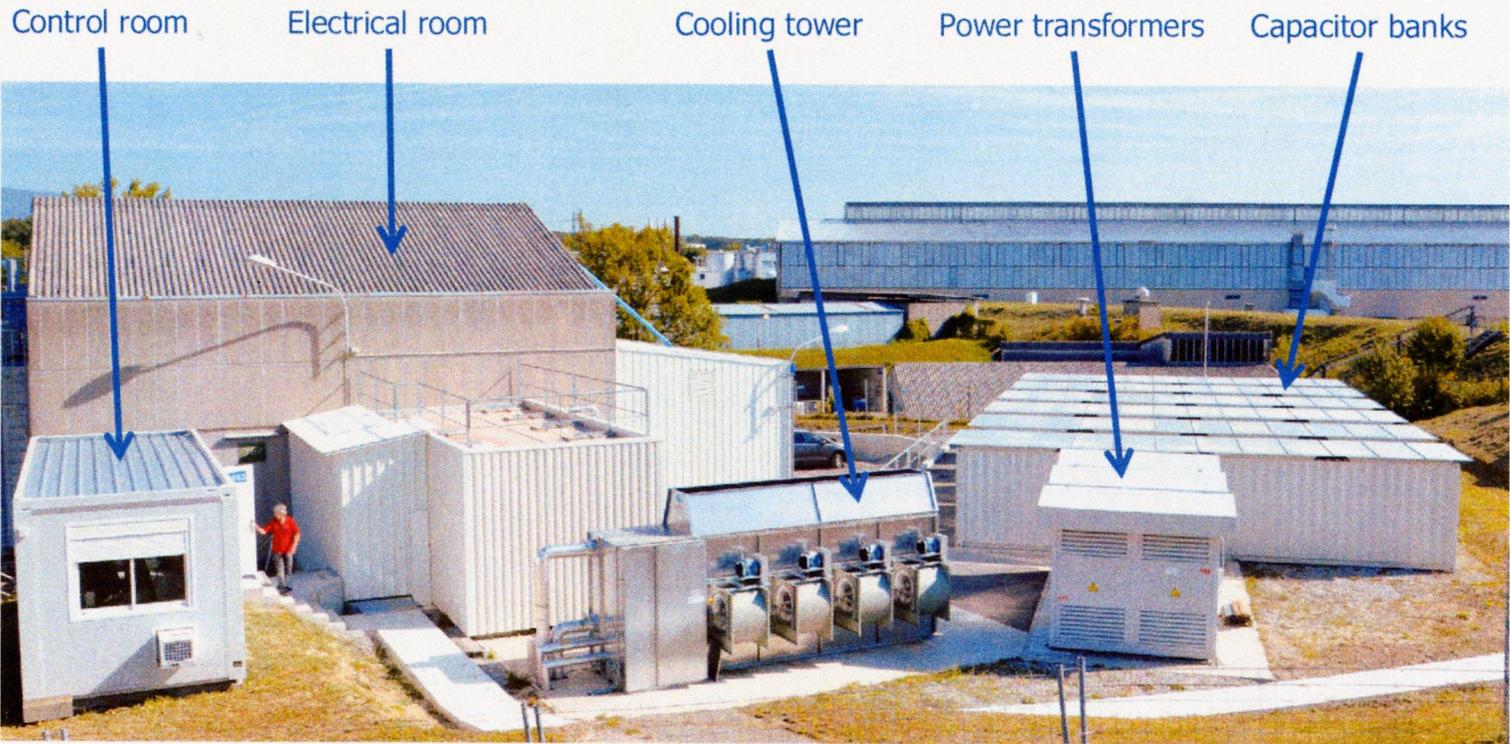


電力貯蔵システム

FWG	早い応答 繰り返し応力 メンテナンス	電鉄:京浜急行 25 kWh 核融合:JT-60 1300 MJ 電力:沖縄電力 200 MJ 加速器:J-PARC
SMES	早い応答 高効率 交流損失	加速器:BNL NSLS μ -SMES 2.4 MJ UPS:シャープ亀山工場 10 MJ 電力:国プロ 負荷変動補償 20 MJ ESK 3.6 MJ 加速器:J-PARC, CERN-PS/SPS
Capacitor	早い応答 中小規模 寿命	加速器:BNL-AGS HEV車 自立型街灯 ~100,000回 無限回 (CERN) ?
Battery	中小規模 寿命 メンテナンス	HEV車 ~1,000回

The en
The ca

- DC/AC
- Four
- Only system



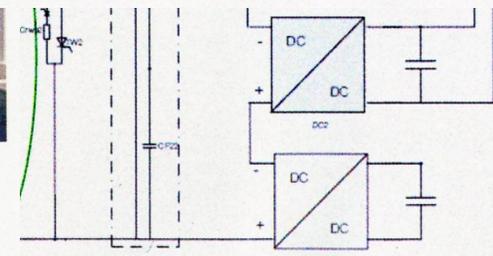
Capacitor banks

- 5kV Dry capacitor
- Polypropylene met
- Outdoor container
- 0.247F per bank,
- 1 DC fuse
- 1 earthing switch
- 3 MJ stored per bank

60 tons of capacitors divided in 6 capacitor banks making in total 18.5MJ

Up to 14MJ can be extracted during a cycle!

The capacitors represent 20% of the total system cost.



キャパシタ方式

CERN (Jean-Paul Burnet)

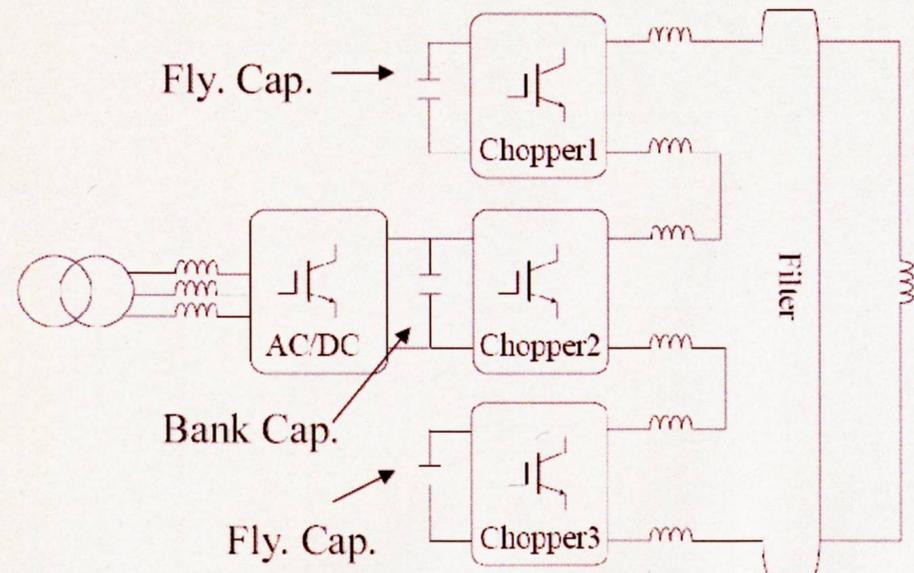
キャパシタ方式R&D J-PARC (中村衆氏)

Magnet Family Name	# of P. S.	Fly. Cap. (mF) / chopper	Bank Cap. (mF)	# of Fly. Cap. / chopper	# of Bank Cap.	Weight (kg)	Volume (m ³)
BM1-6	12	414	306	138	102	7560	113.4
QDN	2	180	120	60	40	3200	48.0
QDX	2	93	63	31	21	1660	24.9
QFN	2	153	96	51	32	2680	40.2
QFX	2	132	84	44	28	2320	34.8

- 1.8kV NPCチョッパー(IGBT)の三直列
- 個数、容量等は電源一台あたり
- コンデンサ1個の容量は3mF
- コンデンサ1個の重量は20kg
- コンデンサの容量密度は10mF/m³

コンデンサだけの価格

¥500,000,000- ~ ¥700,000,000- (概算)



HISTORY OF THE STUDIES FOR ENERGY STORAGE SYSTEM AT 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.

SMESの歴史：これまでの研究開発経過

米国では1960年代末から

日本では1970年代 KEK-PSから

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, p.254

3-MJ MAGNET FOR SUPERCONDUCTIVE ENERGY STRAGE

T.Shintomi, M.Masuda, H.Sato and K.Asaji, Advances in cryogenic Engineering, 25(1980)98-104

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

M.Masuda et al., Proceedings of the 2nd Meeting of Superconductive Coil Energy Storage, Tsukuba, February, 17-18, 1978 (partially in English), KEK-78-26 February, 1979 A

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”、1977年8月、JAERI-M 7201

加速器電源におけるエネルギー貯蔵装置の検討

1997-2002年度：KEK機構長留保

1999-2000年度：科学研究費基盤研究C2

2003年度-2006年度：KEK共同開発研究

FW実験：機構超留置・科研費：

75kW-FW → 岡山大学パワエレ研究室 赤木(現東工大)、
小笠原(宇都宮、現北大)、渡辺(現、J-PARC-RCS)

SMES実験：共同開発研究：

10kJ-SMES → 阪大工学部伊瀬研

J-PARC-SMES設計検討：阪大工学部伊瀬研、東工大嶋田研、SMES研究会

高エネルギー研究所の

3. 試験研究テーマ

SMES によるシンクロトロン電磁石電

4. 試験研究テーマの概要

- ・ SMES によるシンクロトロン電磁石電源の安
- ・ 50GeV リング電磁石電源への SMES の有効性

5. 重点技術分野

・
・

6. 試験研究期間

- ・ 15-17 年度

7. 試験研究費

- ・ 2 億円

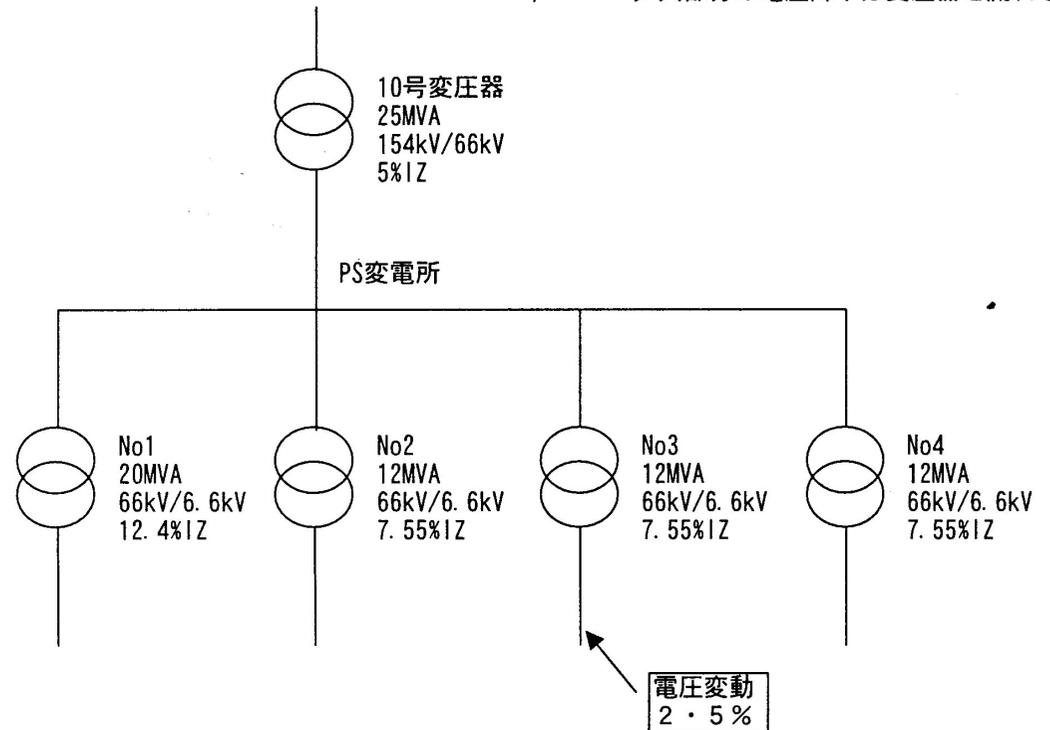
8. 連絡担当者

- ・ 高エネルギー研究所 佐藤教授

[セプタム電磁石電源 (EP1, EP2) 同時運転時の電圧降下計算]

セプタム電磁石運転によるNo3主変圧器2次電圧の降下			
10号主変圧器容量	MVA	25	
10号主変圧器%IZ	%	5.00	
10号主変圧器%IX (推定)	%	4.98	仮定IR/IX
10号主変圧器%IR (推定)	%	0.50	0.1
No3変圧器容量	MVA	12	
No3変圧器%IZ	%	7.54	
No3変圧器%IX (推定)	%	7.50	仮定IR/IX
No3変圧器%IR (推定)	%	0.75	0.1
セプタム総合力率	-	0.60	
セプタム総合皮相電力	MVA	2.15	
電圧降下率	%	1.52	

↑ --- > 大部分の電圧降下は変圧器を流れる



「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトに対する提案書

研究開発テーマ

「負荷変動補償用SMESシステムの実系統連系実証試験と低コスト大容量電力変換システムの開発」

項目：SMESシステムの開発

- ・ システム構成技術の開発；低コスト大容量電力変換システム
- ・ 実系統連系試験

平成16年4月26日

組織名 (大学共同利用機関法人) 高エネルギー加速器研究機構

代表者名 (機構長) 戸塚 洋二

所在地 つくば市大穂1-1 (郵便番号 305-0801)

連絡先 所 属 加速器研究施設

役職名 教授

氏 名 佐藤 皓

所在地 つくば市大穂1-1 (郵便番号 305-0801)

TEL 029-864-5272

FAX 029-864-5591

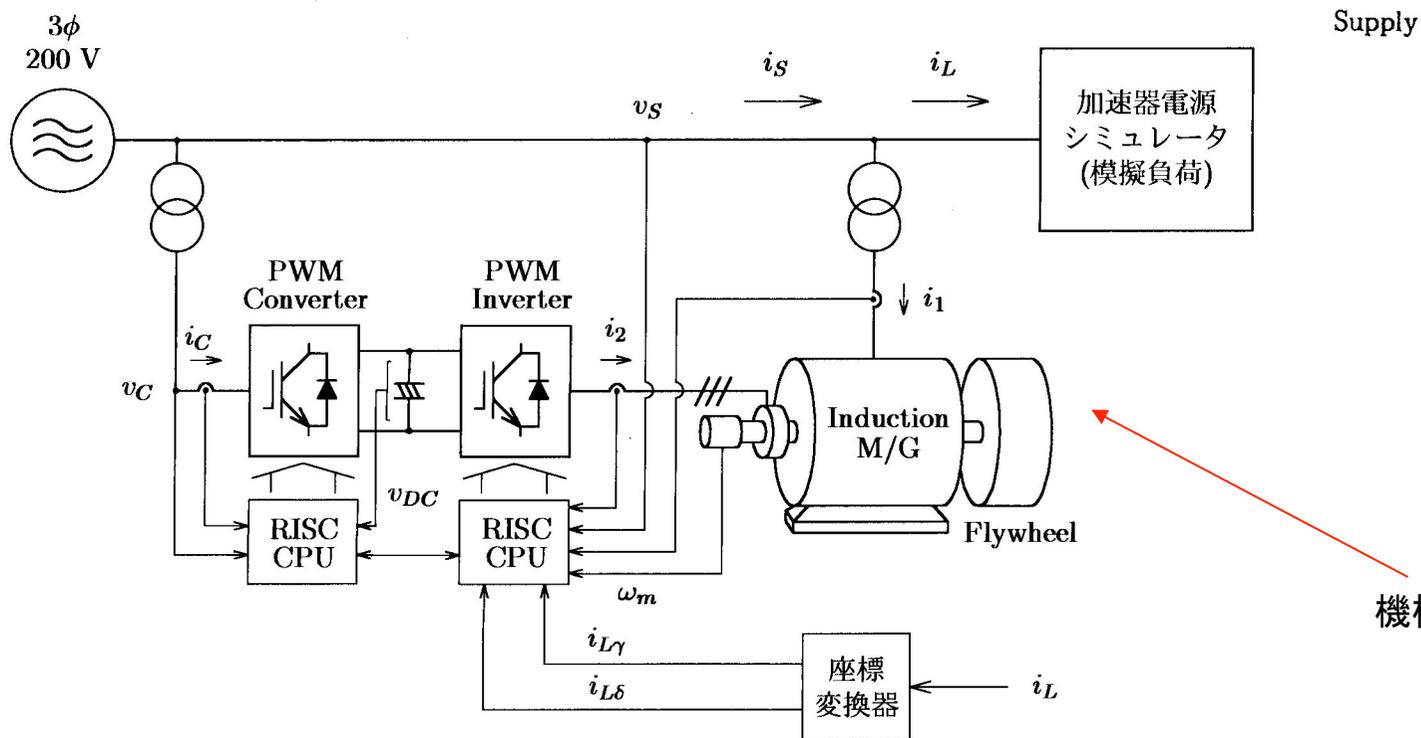
e-mail hikaru.sato@kek.jp



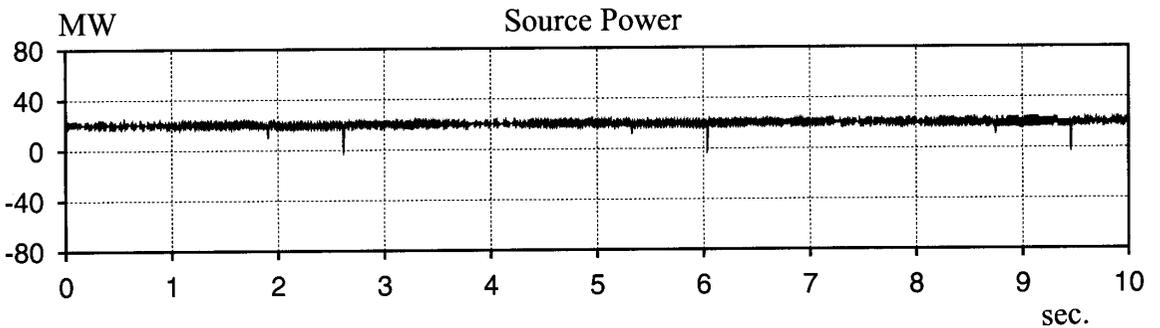
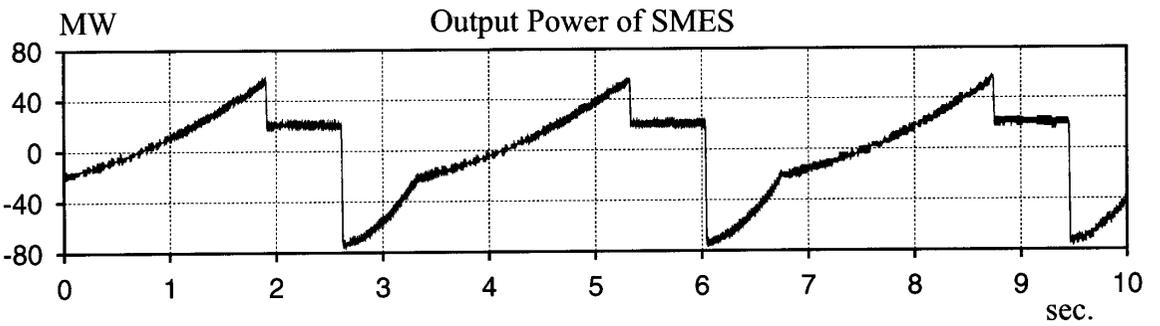
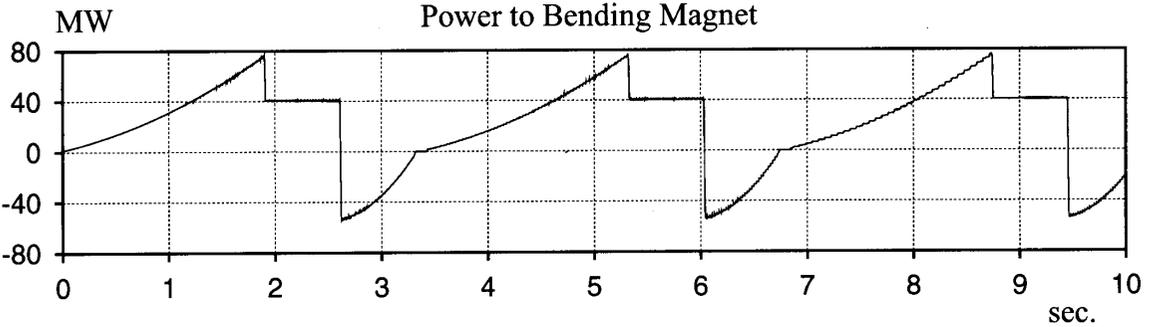
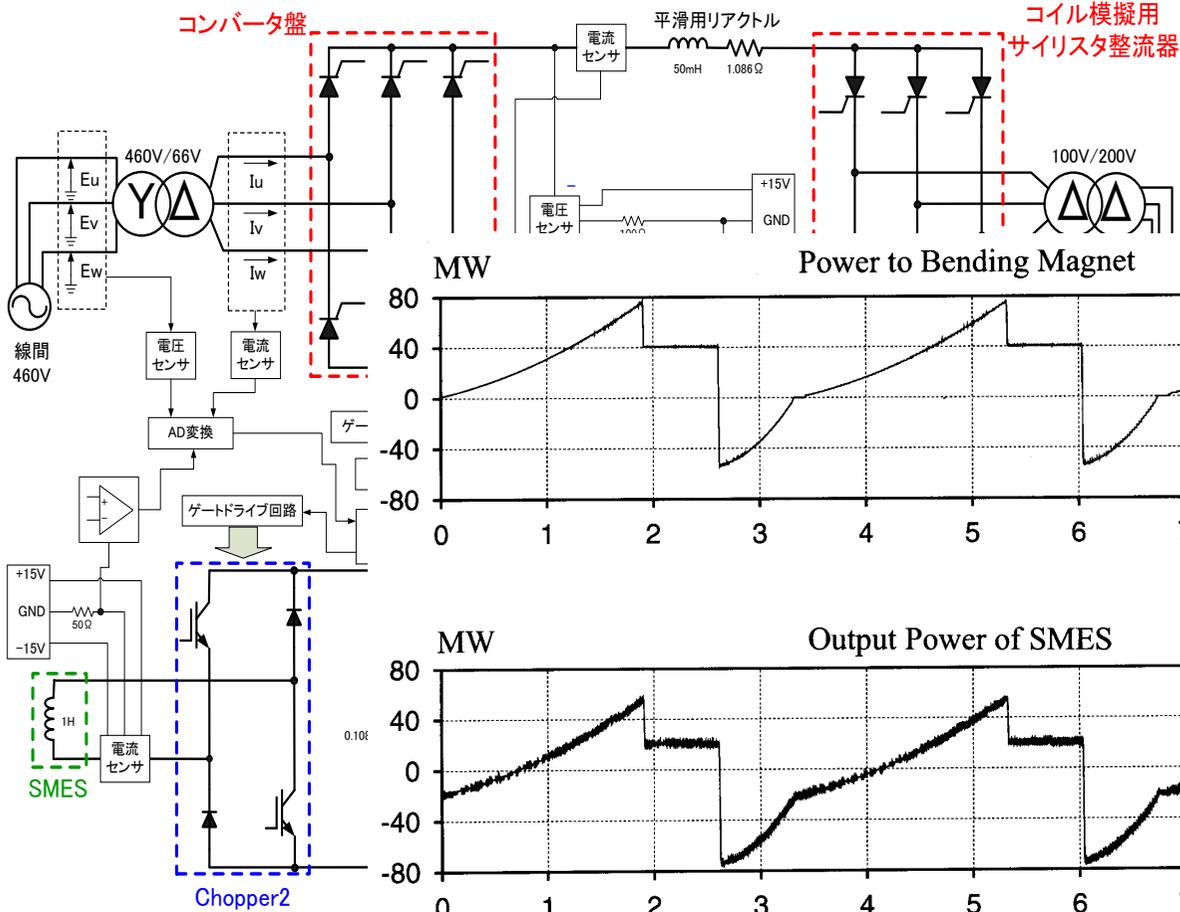
次期加速器電磁石電源の電力変動抑制装置 - 交流励磁フライホイール発電機システムとその制御 -

有田 吉宏* 渡辺 泰広 藤田 英明 赤木 泰文
 (岡山大学)

佐藤 皓
 (高エネルギー加速器研究機構)



第5回加速器電源シンポジウム KEK Proceedings 99-20
 IEEE論文賞 (IEEE Transaction on Power Electronics, 17(2002)109-116)



50GeV-SMES-1/1
阪大と

主なシンクロトロン加速器と電源安定化設備

研究所	KEK	KEK/JAEA	CERN	
加速器名	12GeV-PS	J-PARC	PS	SPS
繰り返し (s)	2.5- 4.0	3.64	2.5	8.94
P _{total} (MW)	23.6	105	40	152
受電電圧 (kV)	154/66/6.6	66/22/6.6	130/18	400-18 400/66/18
Comments	20MVA SVC Shut down at March 2006	51MVA-FW 90MVA-SMES	7MW-Motor 90MVA FW (233MJ) → SVC or SMES LHC入射器	100MVA SVC

Capacitor 18.5MJ

The 10 Bev proton synchrotron of the Academy of Sciences USSR

V. I. Veksler et.al,

The Soviet Journal of Atomic Energy 1956, Volume 1, Issue 4, pp 469-478

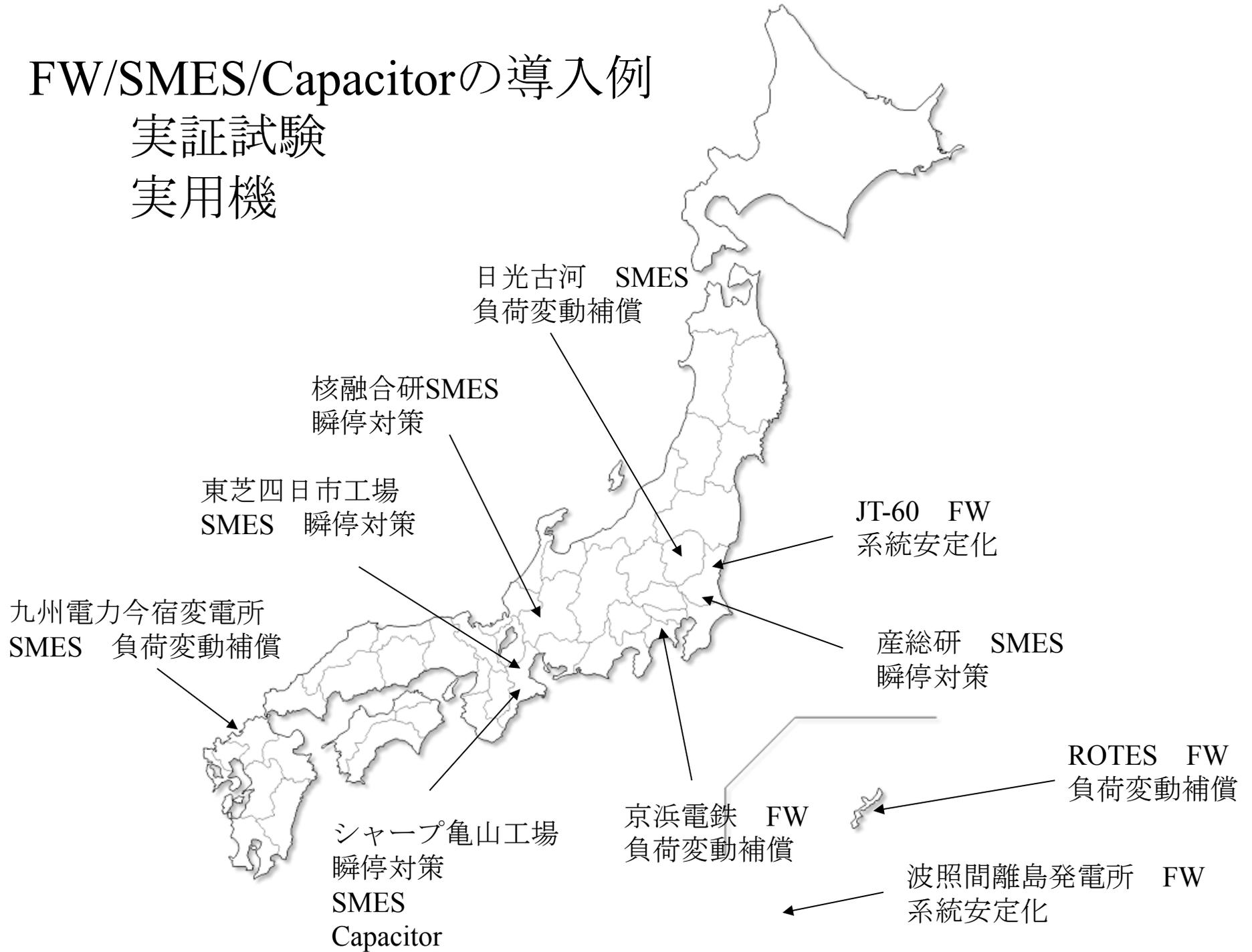
Max. Power;140MVA, Max. Current;12.8kA, Max. Vol.;11kV

4台のフライホイール

研究所	BNL		FNAL	
加速器名	Booster	AGS	MI	SF-MR
繰り返し (s)	0.13-1.1	1.4-3.0	2.9	2
P_{total} (MW)	12	50 70	11.9	198
受電電圧 (kV)	138/69/13.6	138/69/13.6	13.8	13.8
Comments		9MJ MG (34MJ MG) → 12.6MJ Capacitor		Harmonic Filter 超伝導加速器

研究所	GSI			Medical Use Machine in Japan
加速器名	SIS-18	SIS-100	SIS-300	
繰り返し (s)	0.25	1.2	14	
P_{total} (MW)	30	43	34	2.6
受電電圧 (kV)	200 Future 330	110/20	110/20	6.6
Comments		超伝導加速器		SVC

FW/SMES/Capacitorの導入例 実証試験 実用機



日本におけるSMESの実績

- 電力業界では使用電力の平準化や系統安定化等にSMESを応用する研究開発
- NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)による国家プロジェクト

1991-1998年度：電力系統安定化装置および負荷変動補償装置のための要素技術開発

1999-2003年度：SMESのコスト低減技術を中心とする技術開発

2004-2007年度：超電導電力ネットワーク制御技術開発：実証試験

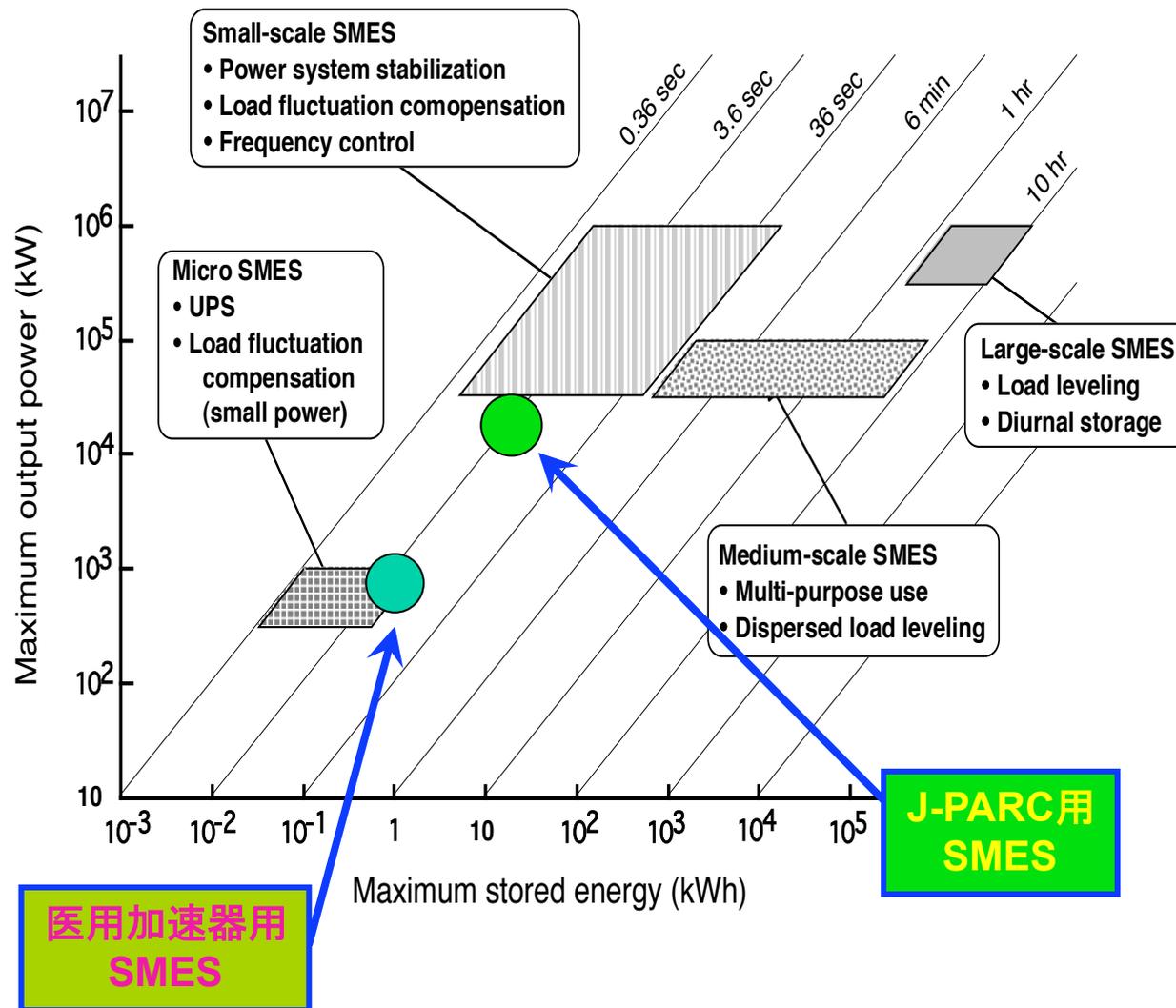
ISTEC(国際超電導産業技術研究センター)

九州電力

中部電力

加速器応用のSMESの規模

- 瞬低用
 - ~1 MJ
- 変動負荷補償
 - 繰返し負荷
 - < 10 秒
 - 数 MJ ~ 数十 MJ



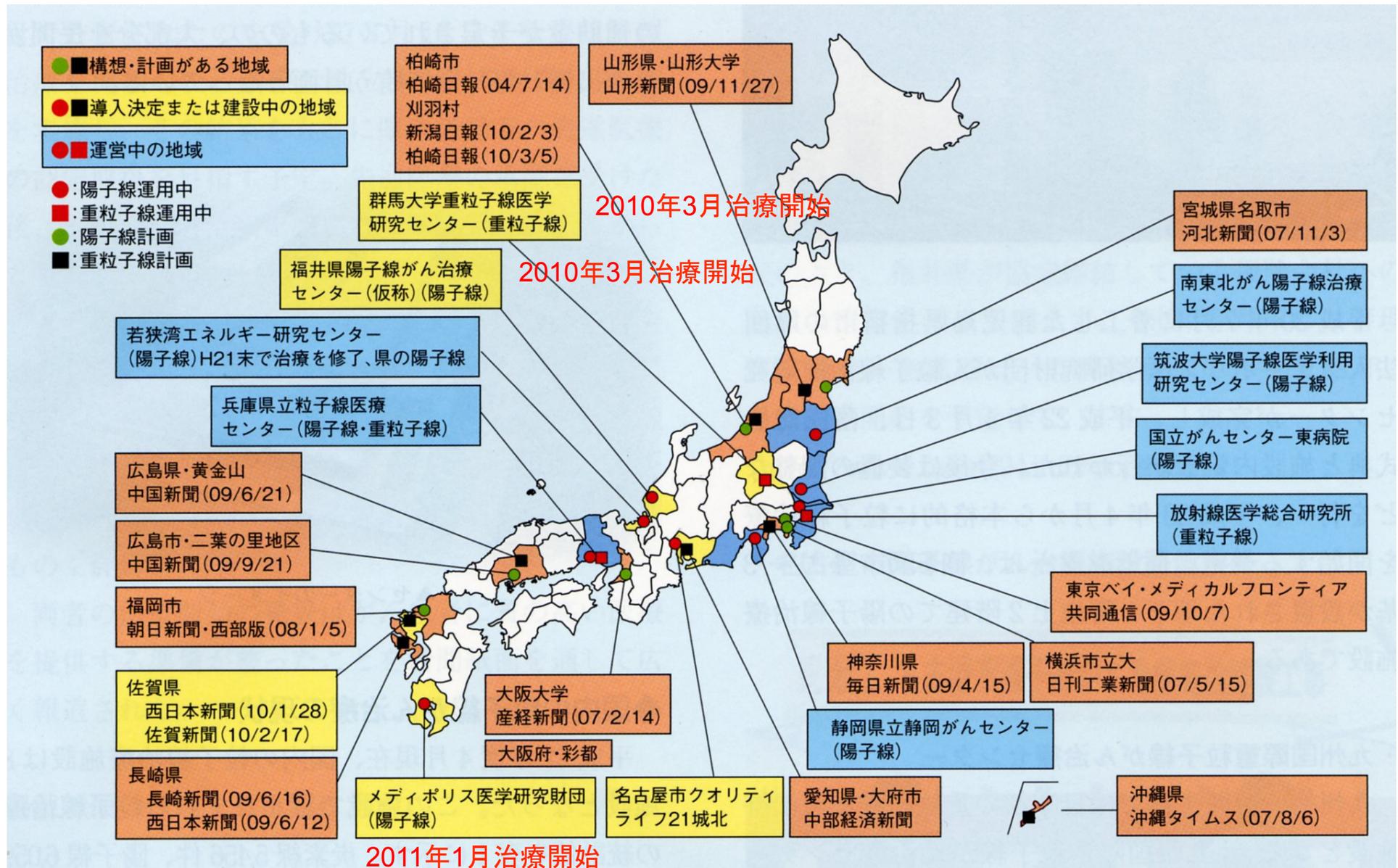
医療用加速器施設への提案

- ・既存の医療用加速器へエネルギー貯蔵装置を付加する。
- ・今後建設計画のある医療用加速器について、当初からエネルギー貯蔵装置を持った電源システムの設計。
- ・瞬停対策とするか、負荷変動安定化とするか、両方とも可能とするか。
- ・少々容量過大でもNEDOなどの既存の装置を再利用するメリットがあるか。特に、コスト面で。
- ・減価償却を含めた、コスト面での比較。その際装置寿命を10年とみるか、20年とみるか。

医療用加速器へのSMES／FWの応用

- ・J-PARC用に検討したことがそのままスケールダウンでき、
- ・1－2MJの容量のSMESで対応できる。
- ・SMESであれFWであれ、この程度の規模でよい。
- ・小型加速器であるがゆえに、特高受電を行わず、一般商用ラインより受電する。
- ・従って、安定化を考慮することは重要である。
- ・治療用装置であることをも考慮すると、瞬停対策も重要である。
- ・J-PARCで検討してきた、SMES等のエネルギー貯蔵装置がスケールダウンした形で十分に適用できる。
- ・電気2重層キャパシタも、繰り返しを多少遅くすれば、HEVトラック搭載型が適用可能と思われる。

日本の医療用加速器施設



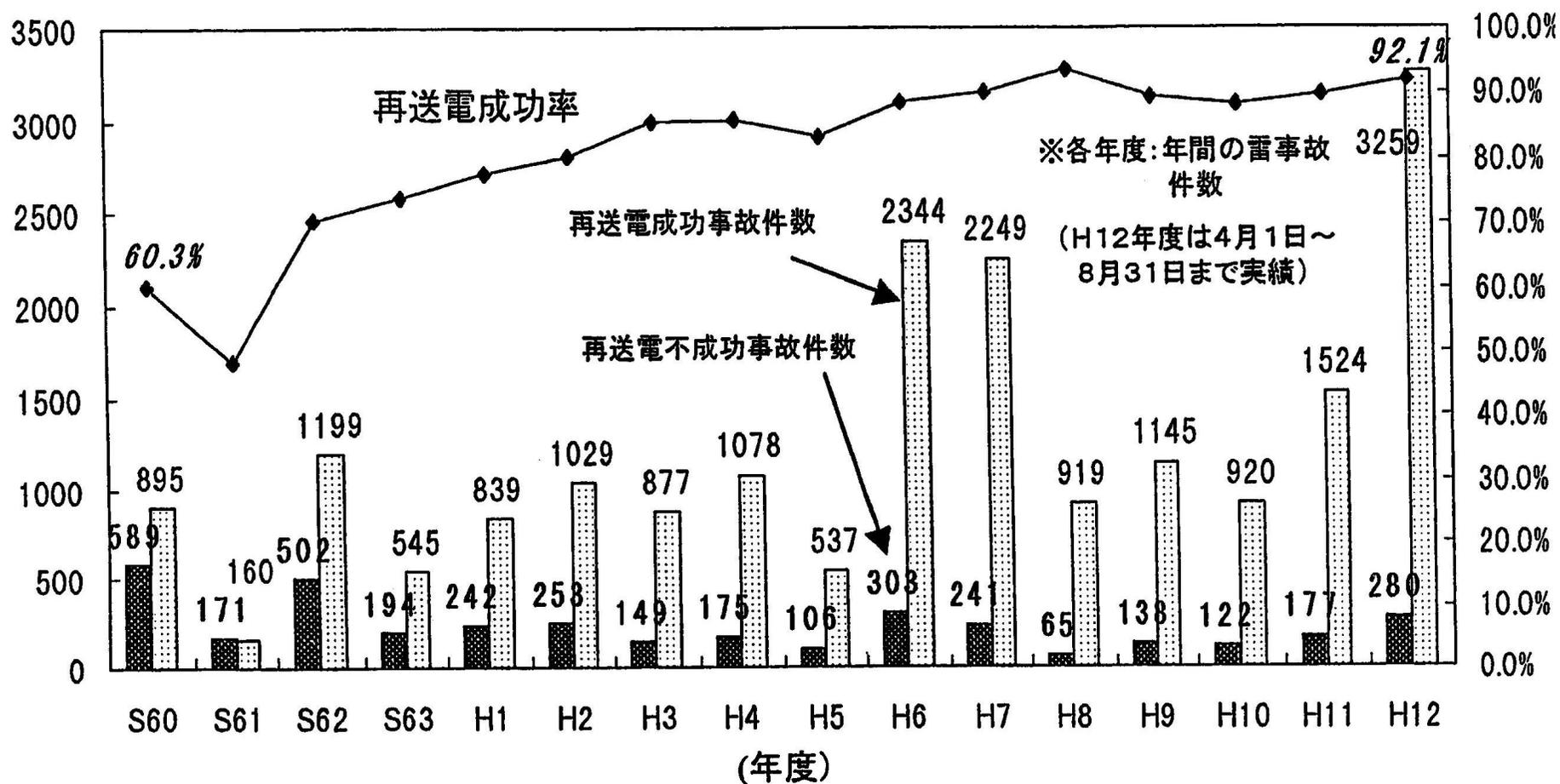
2010年3月現在 医用原子力技術研究振興財団調べ(佐藤が加筆)

2013年3月時点	
九州国際重粒子線がん治療センター	2013年7月治療開始
名古屋陽子線治療センター	2013年3月治療開始
相澤病院陽子線治療センター	2012年9月完成臨床稼動準備中
神奈川県立がんセンター重粒子線治療施設	2015年12月治療開始目標
北海道大学分子追跡陽子線治療装置(仮称)	2014年4月治療開始目標
大阪府 2017年度粒子線治療開業目標	2017年度粒子線治療開業目標
山形大学に重粒子線治療装置	2012年度補正予算(開発経費)

エネルギー貯蔵装置は瞬時停電に対応する有効な機器

雷による配電線事故状況について

(1) 雷による配電線事故件数の推移



機構からのお知らせ

平成25年7月29日

各位

施設部

つくばキャンパスにおける瞬時電圧低下のお知らせ（7/26, 27）
東京電力（株）送電線での落雷事故の影響により、瞬時電圧低下がありました。

平成25年7月26日（金）

・23:58頃、瞬時電圧低下（6.0%程度 約280ms）

平成25年7月27日（土）

・00:28頃、瞬時電圧低下（13.3%程度 約80ms）

・00:49頃、瞬時電圧低下（11.8%程度 約100ms）

・01:20頃、瞬時電圧低下（9.8%程度 約130ms）

・12:48頃、瞬時電圧低下（4.5%程度 約30ms）

・14:18頃、瞬時電圧低下（5.4%程度 約50ms）

・18:06頃、瞬時電圧低下（7.6%程度 約40ms）

・18:30頃、瞬時電圧低下（7.0%程度 約60ms）

・18:57頃、瞬時電圧低下（4.5%程度 約120ms）

・18:59頃、瞬時電圧低下（5.5%程度 約60ms）

実験設備機器等の異常の有無を確認していただきますようお願いいたします。

問い合わせ先：施設部整備管理課電気グループ

（内線5185）

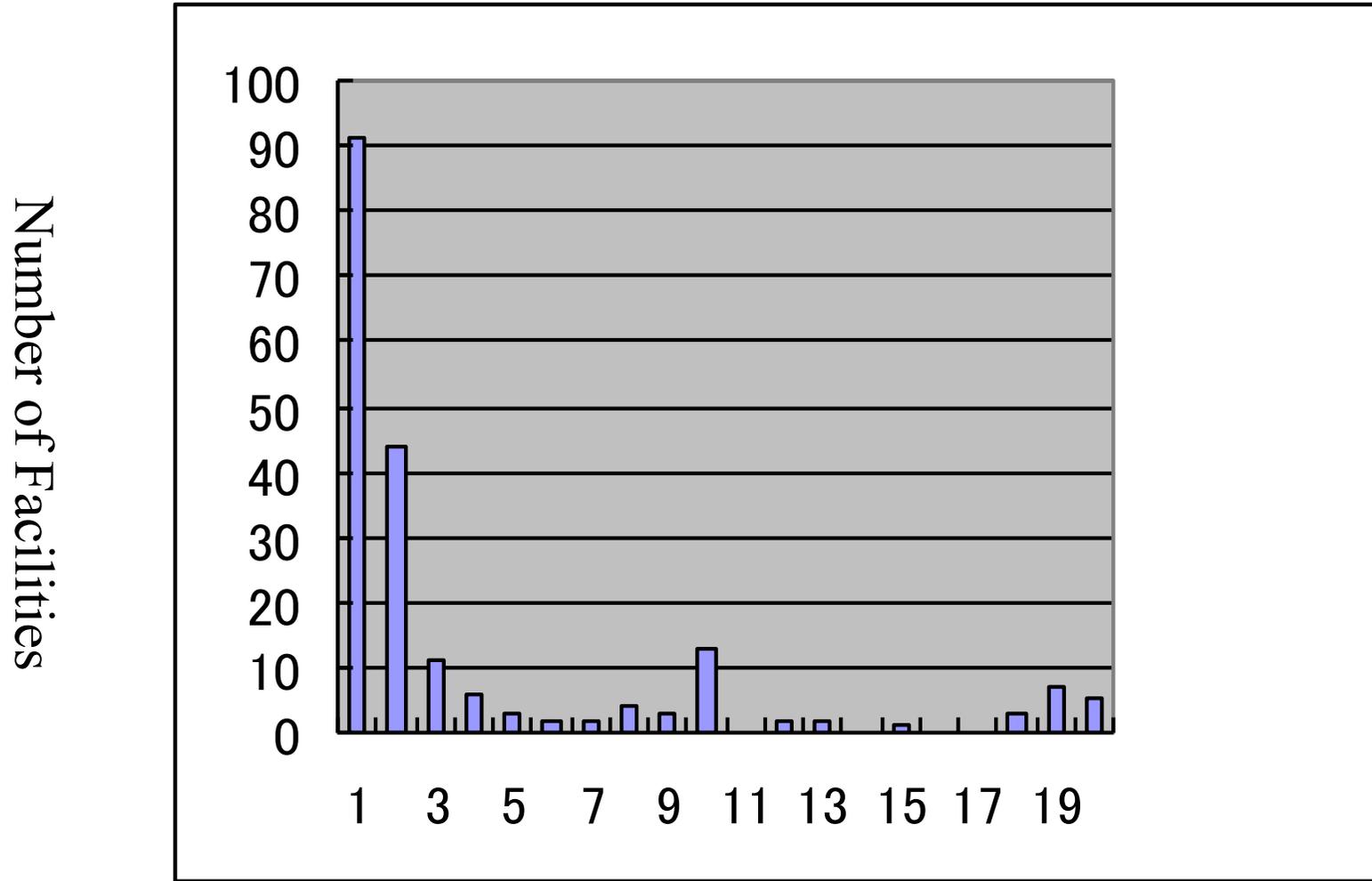
省エネルギー運転

- 運転計画を精緻にたてる。
12GeV-PS
兵庫県粒子線医療センター
群馬大学重粒子線
- Co-Generationの導入
RIBF
- 電磁石の消費電力低減
常電導でもできるだけ抵抗を減らす
超電導化

再生可能エネルギーの導入は？

- メガソーラー
- 風力発電

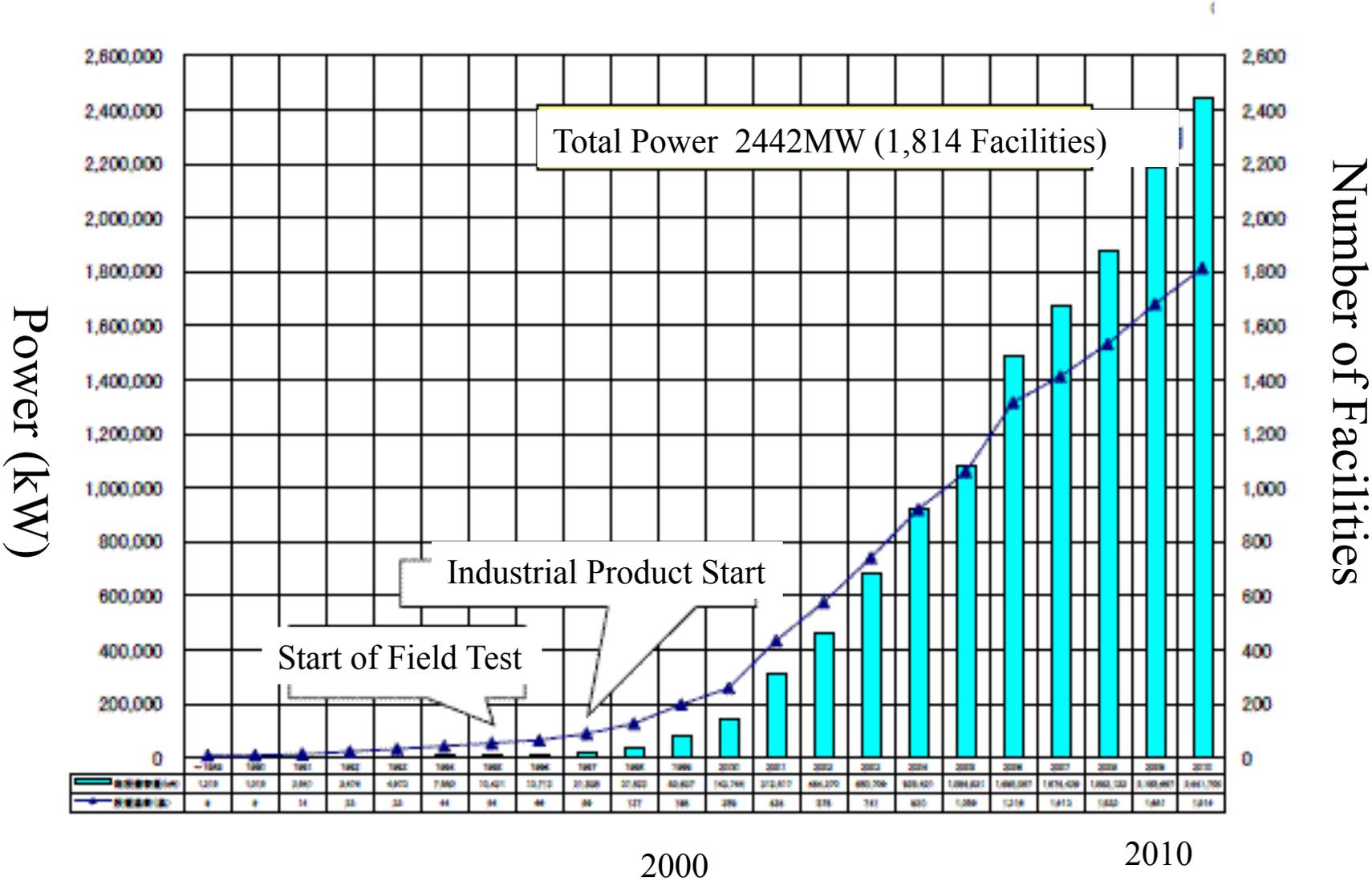
Mega-Solar Facilities in Japan (2012)



Power (MW)

ウィキペディア資料より
佐藤がプロット

Wind Fan Generator Facilities in Japan (2011 March, NEDO)

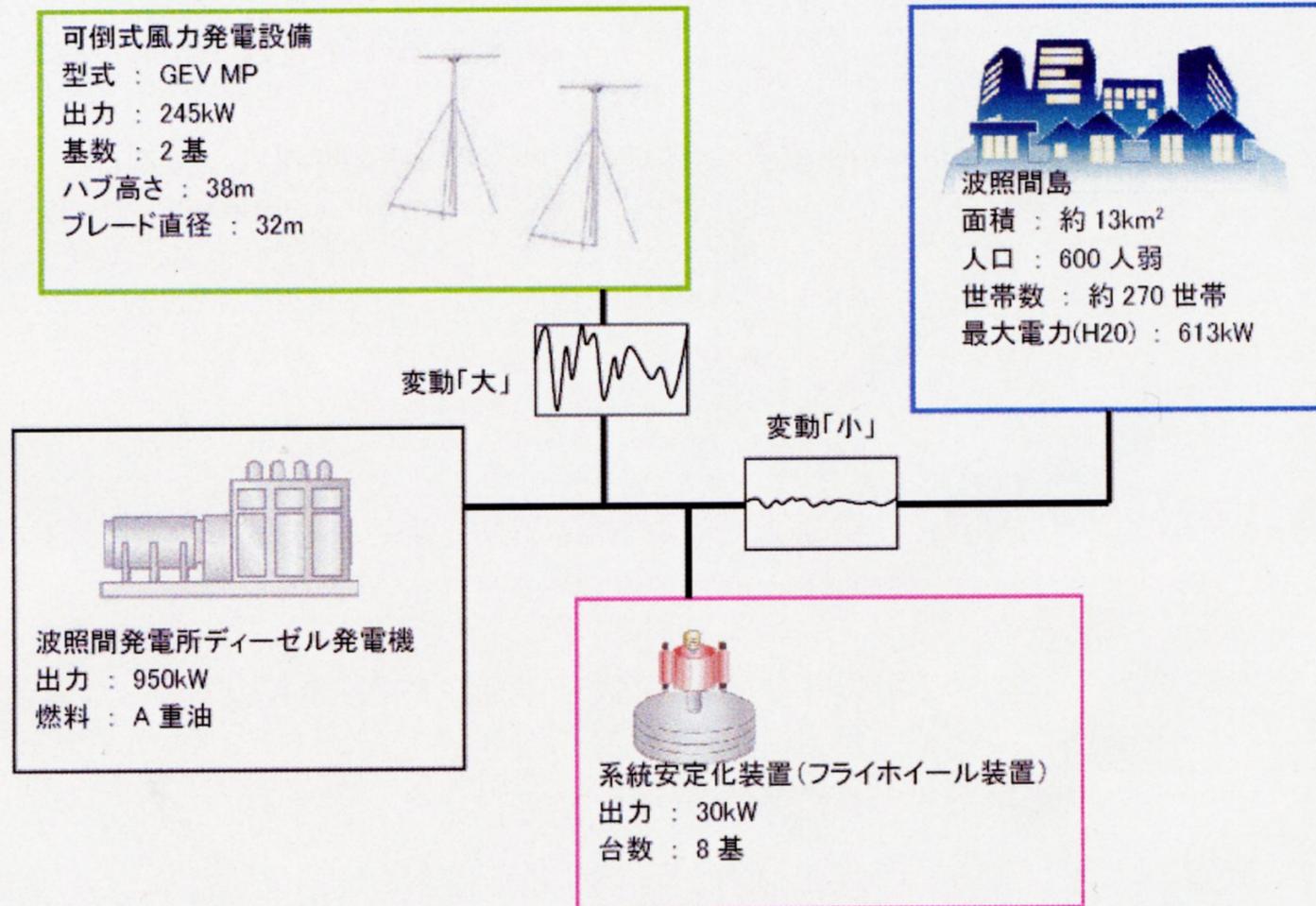


風力発電とFWによる系統安定化

沖縄電力Press Release H21/12/14

波照間島の系統負荷は 613kW 程度であり、可倒式風車 2 基（計 490kW）を設置した場合の系統安定化対策としてフライホイール 30kW×8 基を設置します。

フライホイールは、系統周波数の偏差をみて制御する方式で、これにより系統周波数、系統電圧変動を抑え、風車の発電電力量を最大限利用できるシステムとしています。



まとめ

加速器におけるエネルギー貯蔵装置の応用

大型シンクロトロン: 負荷変動補償、負荷平準化

小型シンクロトロン: 負荷平準化

蓄積リング: 瞬時停電補償

FW: 200MJ-ROTES、500kW級UPS

SMES: 国プロによる瞬停対策・負荷変動補償の実証試験

瞬停対策: シャープ亀山工場: 20MJ

負荷変動補償: 古河電工日光事業所: 20MJ-10MVA

価格的にもFWと競合できる位置に来た

⇒ J-PARC 30GeV 1秒周期の検討

Capacitor: CERN-PS, J-PARC

運転計画の工夫 (12GeV-PS、兵庫)

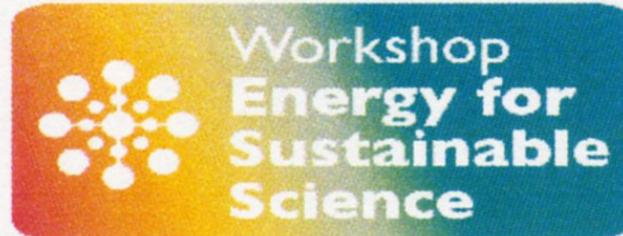
医療用などの小型加速器の省電力化 (群馬、山形)

再生可能エネルギーシステム、**Co-Generation**システムの導入

小型加速器には十分応用可能

大型実験装置の場合も付帯設備に導入し、全体的な運転経費削減

ILC計画にもこういう視点を取り入れるべき。総電力数100MW?



Energy management for large-s
13th – 14th Oc
Lund, Sv



Energies for a sustainable Future

Carlo Rubbia
Institute for Advanced Sustainability Studies
Potsdam, Germany
Venice, June 1st 2012

