

2016年12月12日

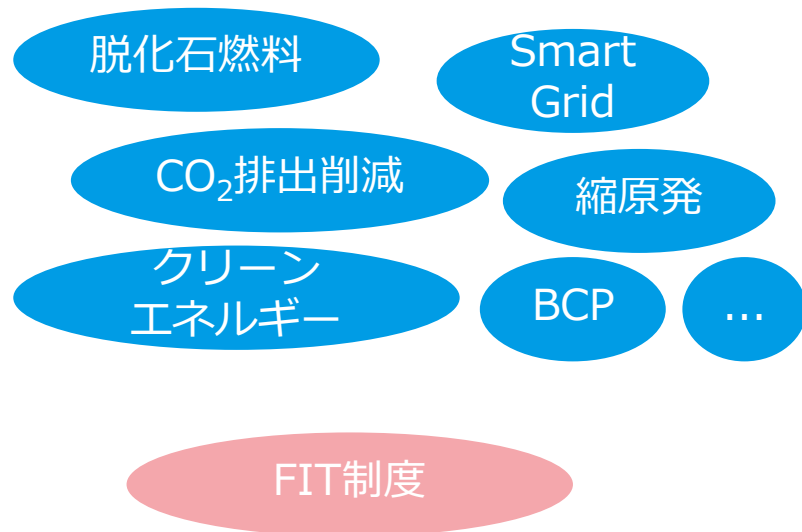
電気学会公開シンポジウム@北海道大学 学術交流会館

レドックスフロー電池システムの 開発と実証

住友電気工業株式会社
柴田 俊和

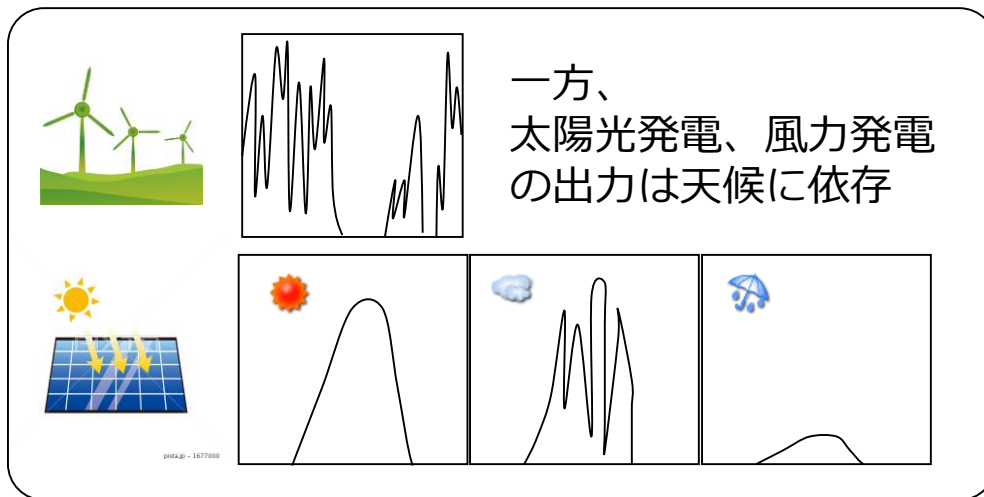
1. 背景
2. エネルギー貯蔵技術
3. レドックスフロー電池の開発
4. レドックスフロー電池の特徴
5. レドックスフロー電池の歴史と標準化
6. レドックスフロー電池の適用事例
7. 今後の課題
8. まとめ

1.1. 分散電源の増加



太陽光発電、風力発電
導入拡大に期待

一般家庭用だけでなく、
事業者の申込み殺到



電力システムを乱す要因。

- 配電系統の電圧上昇問題
- 周波数調整力不足の問題
- ダックカーブ問題 など

大量導入実現には対策が必要。
現状では連系可能量に制限あり。

1.2. 配電系統の電圧上昇問題

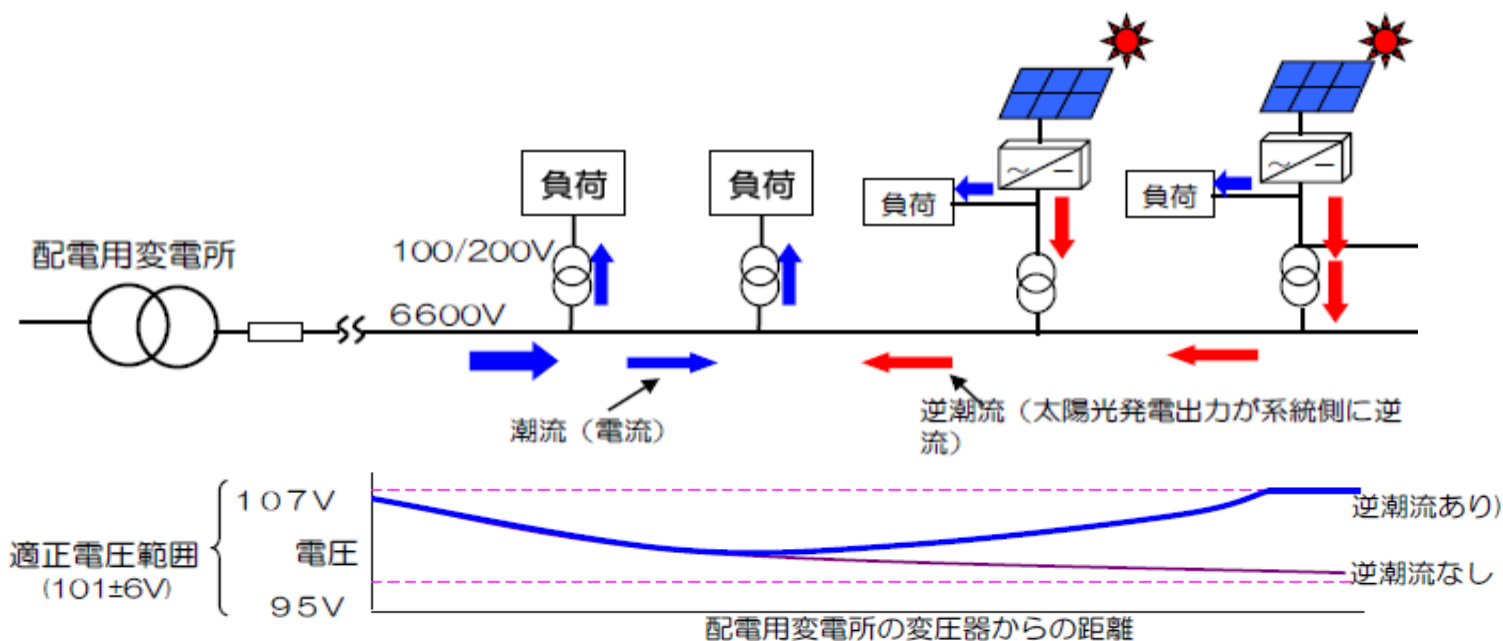
事業所、家庭用の太陽光発電の発電電力が電力消費量を上回る



電力系統に逆潮流、売電



配電系統末端での電圧上昇 → 適正範囲逸脱の可能性あり



対策例

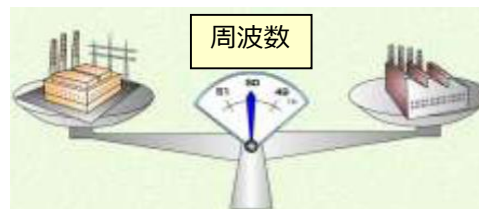
配電線強化、柱上変圧器の増設、電圧調整器の設置、蓄電池導入による逆潮流防止等

1.3. 周波数調整力不足の問題

電力系統における需要と供給のバランスが崩れると周波数が変動する

過負荷 → 周波数低下

過供給 → 周波数上昇



電力会社により、時々刻々と需給バランスを維持するように、発電機出力の調整を実施



自然変動電源(天候により出力が変動)が増加すると、電力会社の周波数調整用電源(周波数調整力)が不足する可能性あり。

対策

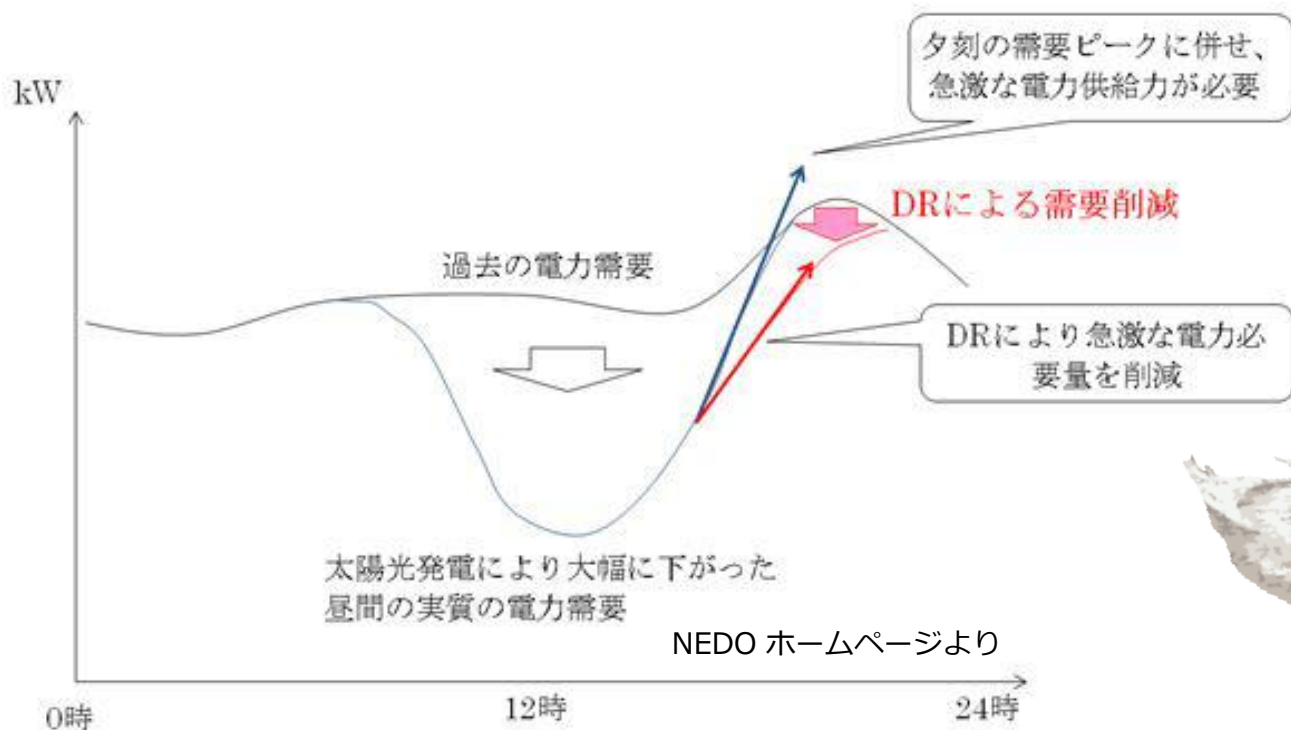
気象予測による太陽光発電、風力発電の出力予測

電力系統全体への周波数調整力としての大型蓄電池の導入

太陽光発電、風力発電の系統連系可能量の制限、出力抑制 等

1.4. ダックカーブ問題

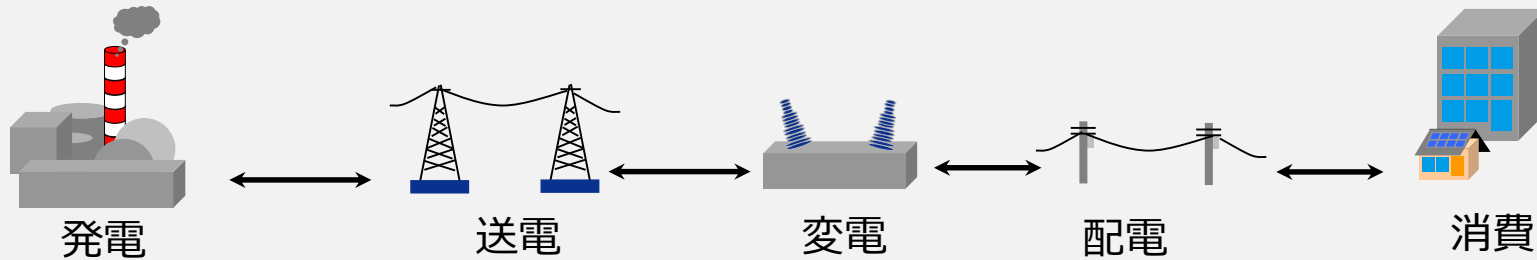
- 太陽光発電の導入拡大により、昼間の太陽光発電による出力が増加し、系統から受電する電力需要は実質的に低下（余剰電力問題）
- 夕刻時の需要ピーク時に、太陽光発電出力も下がり、急激に系統からの受電電力が増加（系統からの供給が間に合わなくなるのではとの懸念）



対策
デマンドレスポンスによる電力使用抑制の協力、蓄電池による対策 等

1.5. 従来グリッドからスマートグリッドへ

従来の電力系統



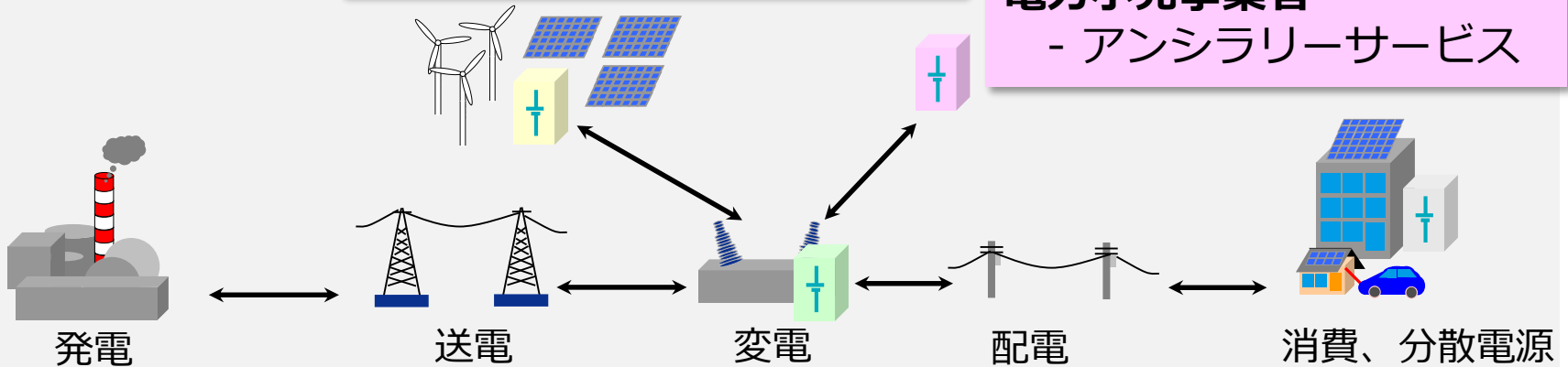
将来の電力系統

発電事業者

- 出力平滑化、
- 計画発電

電力小売事業者

- アンシラリーサービス



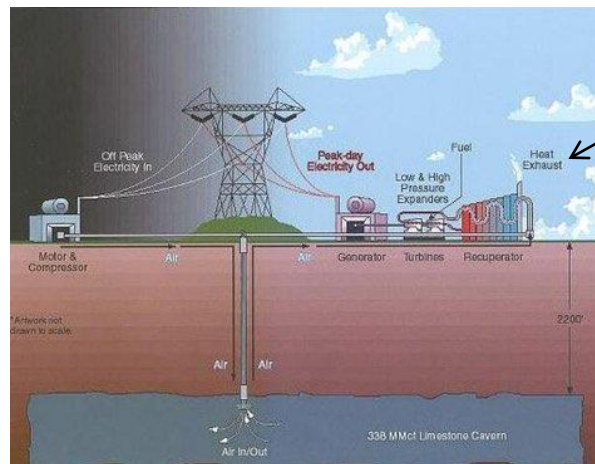
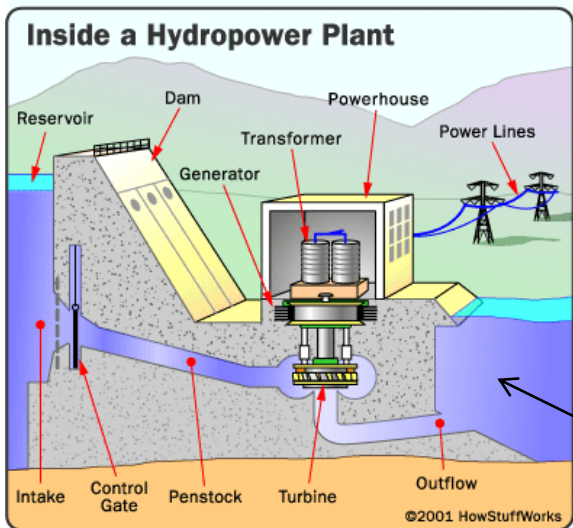
電力会社

- 周波数調整、
- 余剰電力対応

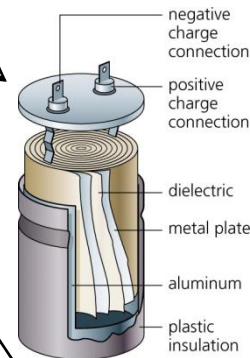
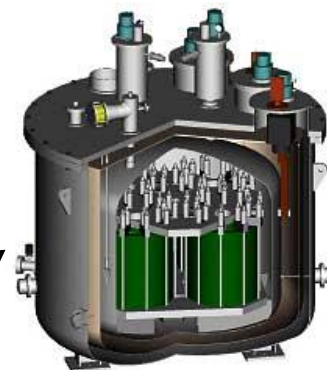
需要家

- 昼夜負荷平準、
- ピークシフト
- 非常用、防災用蓄電池

2.1. エネルギー貯蔵技術



貯蔵技術	貯蔵原理
二次電池	化学エネルギー
SMES	磁気エネルギー
キャパシタ	静電エネルギー
揚水	位置エネルギー
フライホイール	回転エネルギー
CAES	弾性エネルギー



電力系統におけるエネルギー貯蔵要件

- 大容量
 - 高速応答
 - 環境破壊のないこと
- + 低コスト

技術要件を満たす二次電池に期待
(低コスト化がキー)

2.2. 二次電池



リチウムイオン電池

- 高エネルギー密度
- ベンダー多い

鉛電池

- 低コスト
- 実績多い
- ベンダー多い



レドックスフロー電池

- 安全
- 電解液のリユース、リサイクルが可能
- 大容量化が容易
- 設計自由度高い
- 低エネルギー密度

ニッケル水素電池

- 実績多い
(ハイブリッド車等)
- 高出力運転



NAS電池

- 大容量の実績
- 長寿命
- 高エネルギー密度

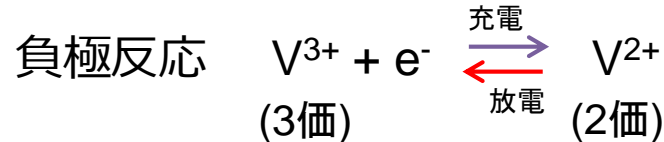
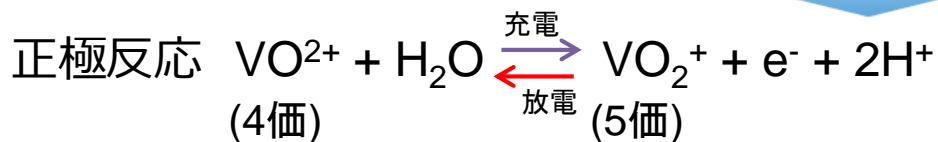
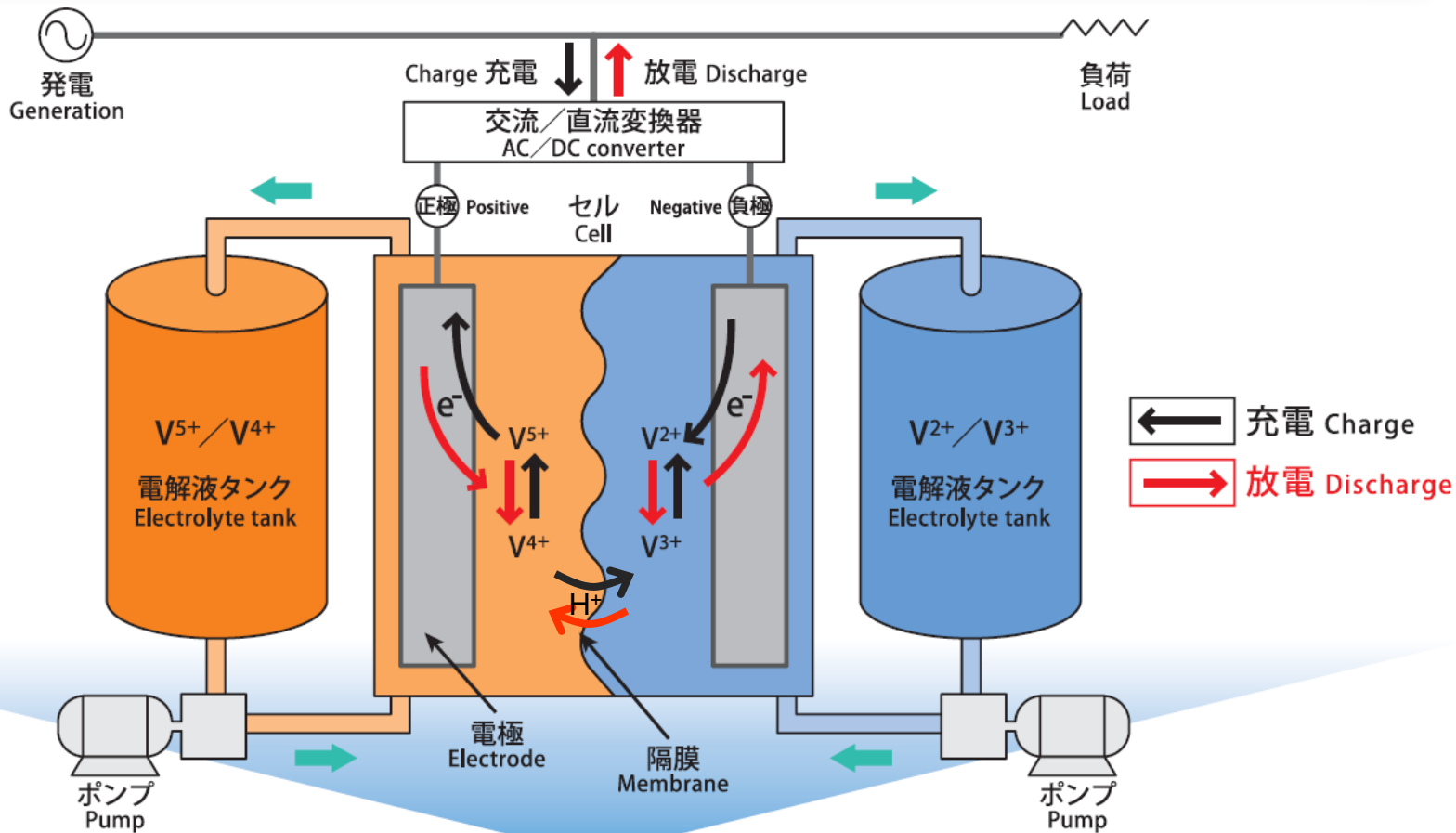


一長一短 → ニーズに応じた二次電池の使い分け (適材適所)

2.3. 各種二次電池の比較

	RF	NAS	鉛	LiB
大容量化	◎	◎	○	△
充電状態の正確な計測・監視	◎	△	△	△
安全性	◎	△	◎	△
資源	△	◎	○	△
加温の必要性	なし	有り ($\geq 300^{\circ}\text{C}$)	なし	なし
充放電頻度の制限	なし	有り	有り	有り
コンパクト化 (高エネルギー密度)	△	○	△	○

3.1. レドックスフロー電池の原理

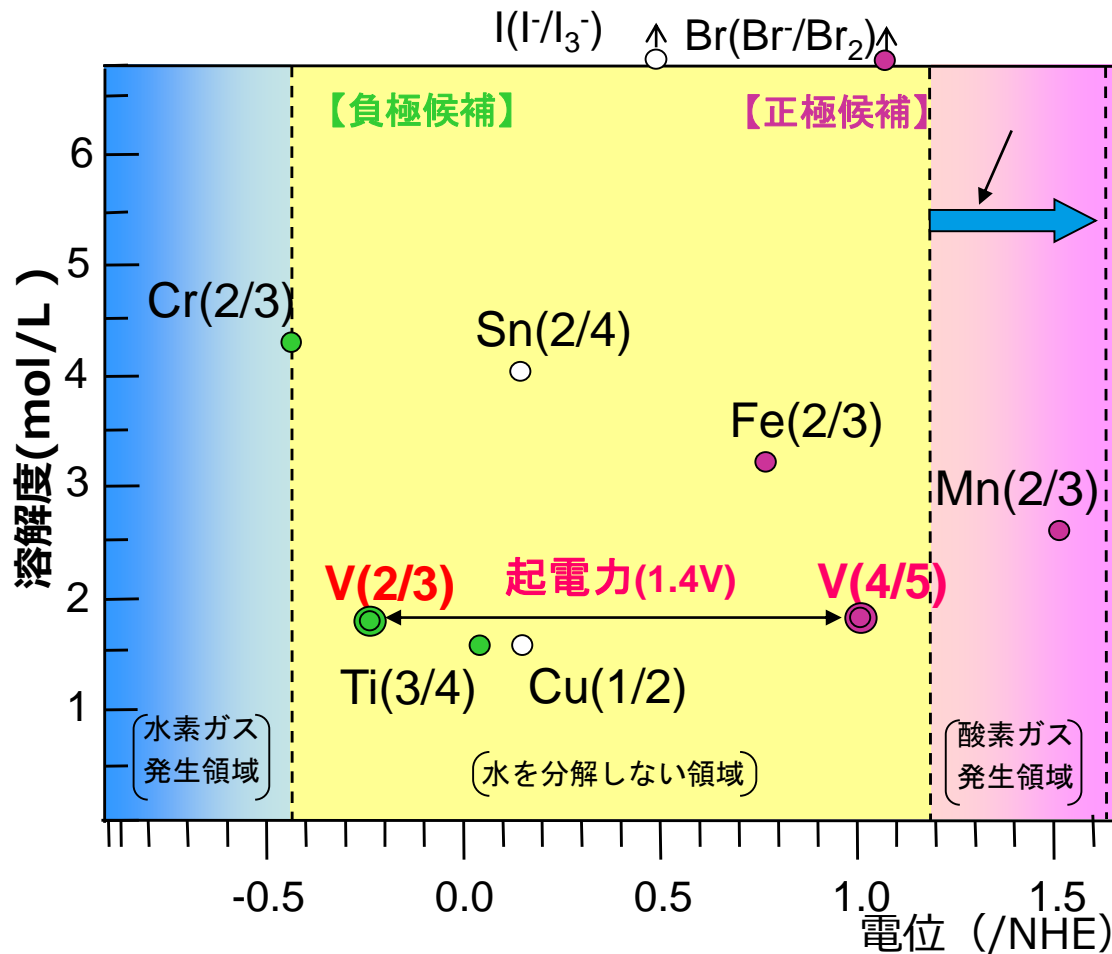


正極、負極ともにV(バナジウム)イオンの価数変化(液相中)により充放電

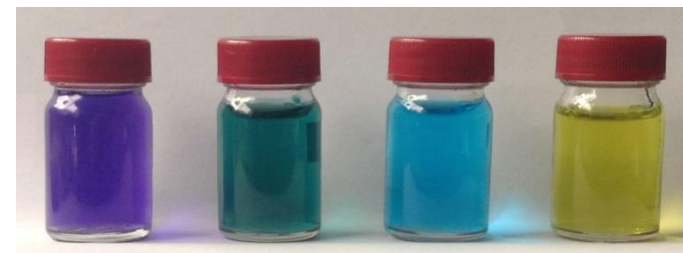


電解液(活物質)の劣化がないため電解液は半永久的に再利用が可能

3.2. レドックスフロー電池の活物質



電解液：硫酸バナジウム水溶液



V²⁺ ↔ V³⁺
負極電解液

V⁴⁺ ↔ V⁵⁺
正極電解液

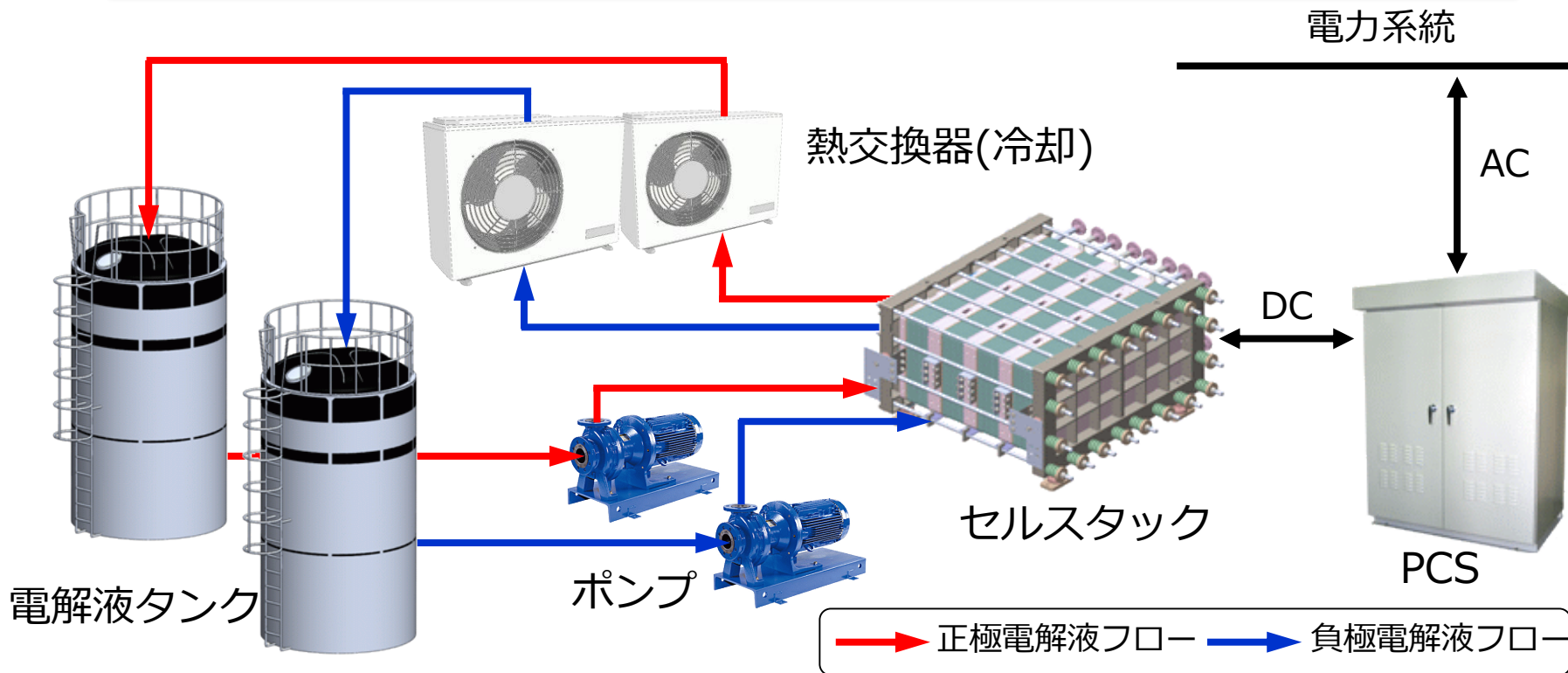
正極、負極ともに同じ活物質(バナジウム)を使用

→ 充放電により液中のバナジウムイオンの価数状態のみが変化

3.3. レドックスフロー電池システムの構成

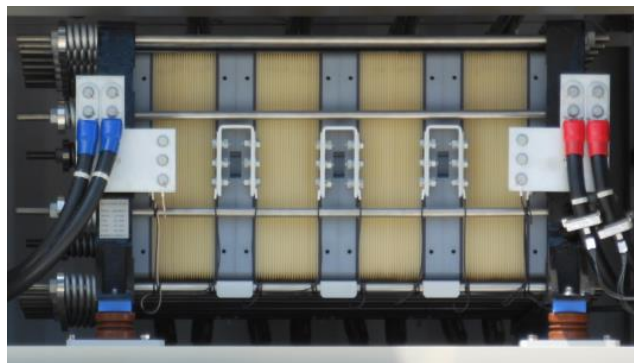
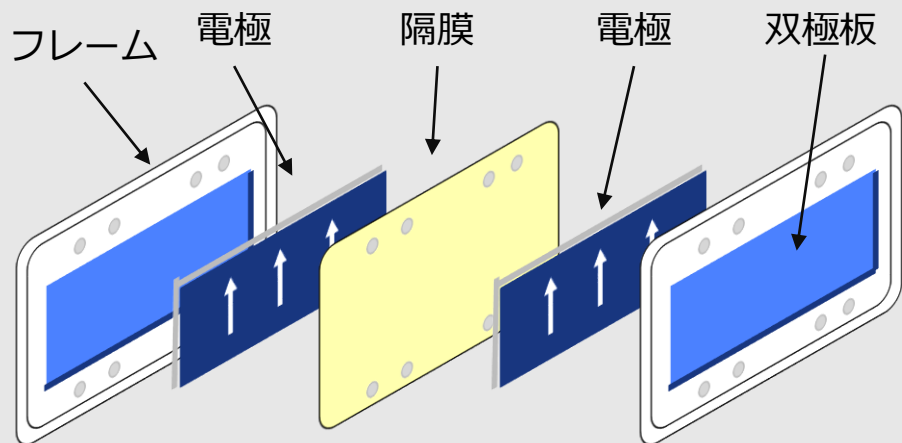


レドックス(Redox) : 活物質の還元(reduction), 酸化(oxidation)
フロー(Flow) : 活物質の溶液を外部タンクに貯蔵しポンプで循環(flow)



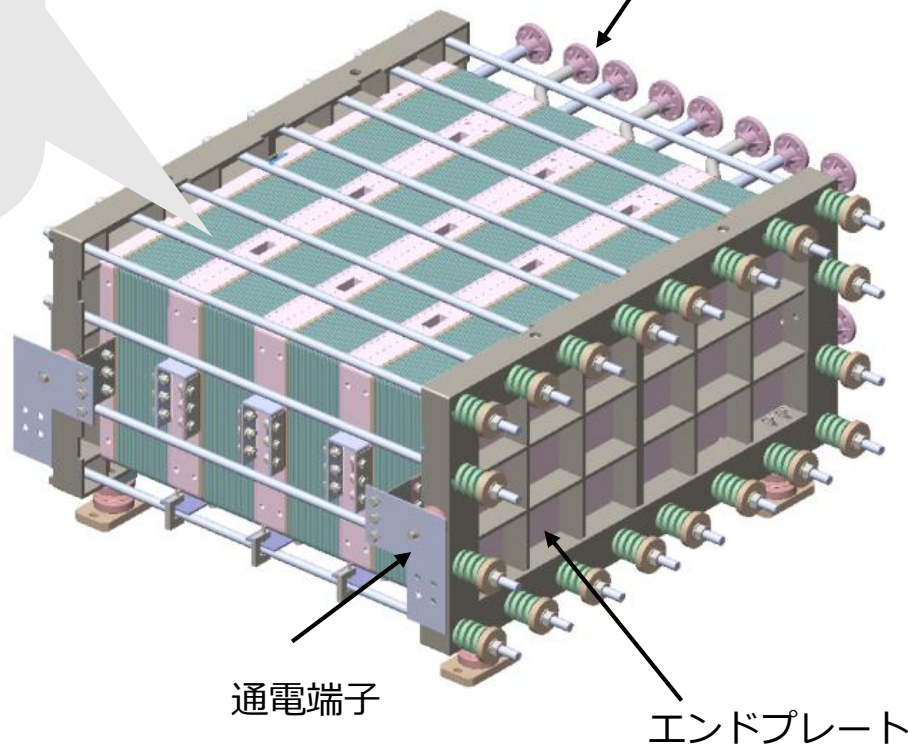
3.4. セルスタック(液体環流型セル)の構造

単セルの構成



セルスタック実機の例

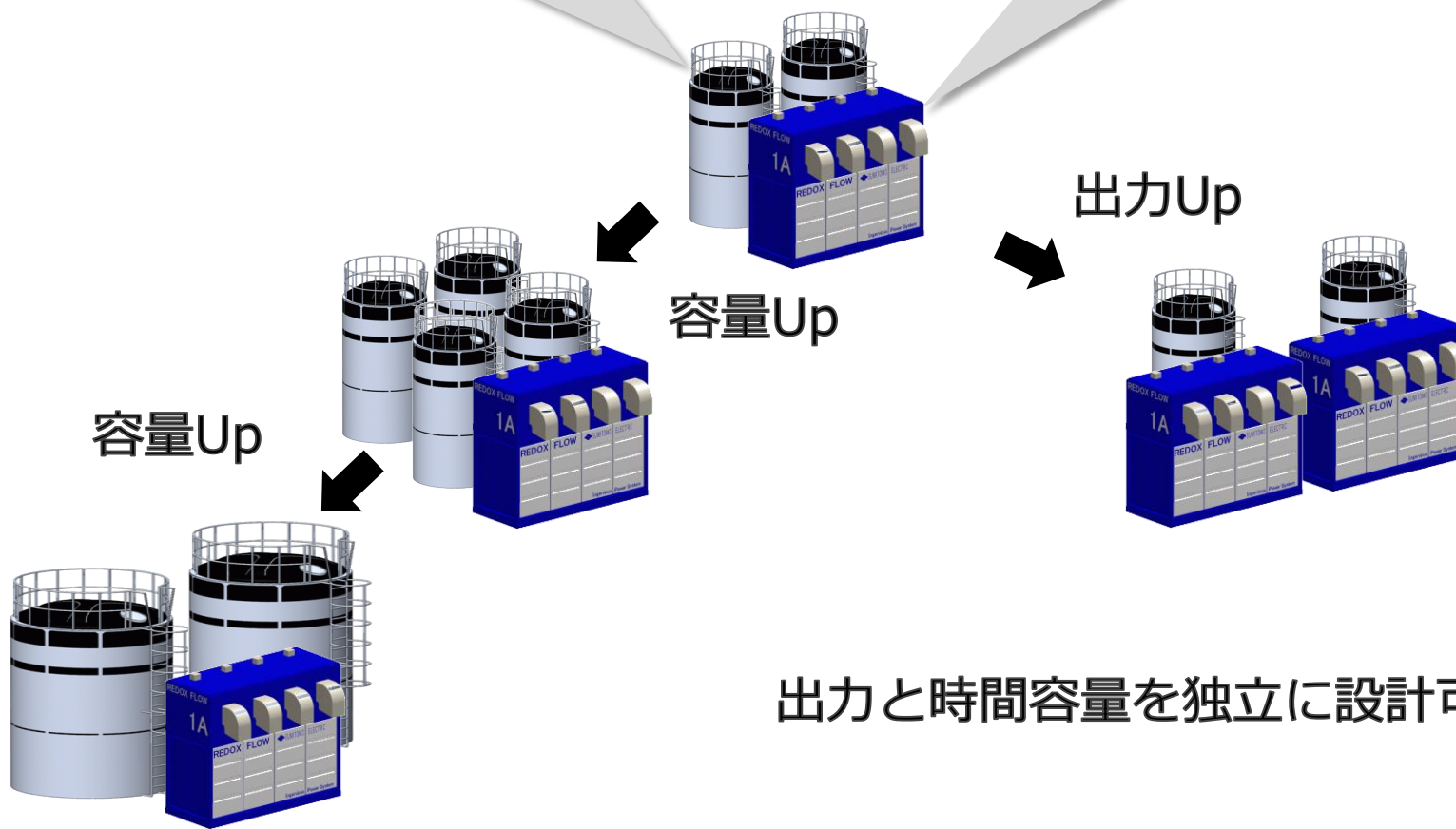
単セルを積層したセルスタックの構造
電解液給排口



4.1. 出力と容量の独立設計

電解液の量(活物質の量)で、
放電時間容量(kWh)が決まる

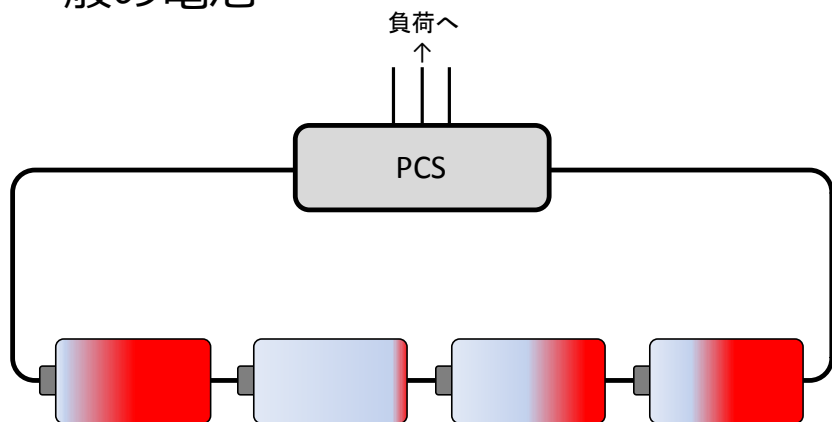
セルスタックの台数で、
出力(kW)が決まる



出力と時間容量を独立に設計可能

4.2. 大容量に適した電池

一般の電池



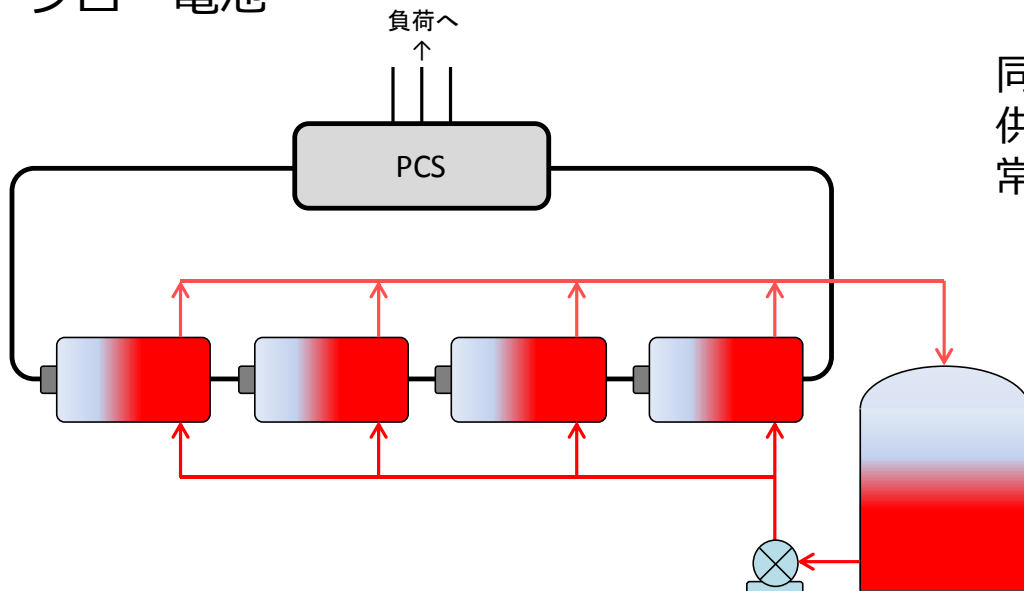
各単電池の性能、劣化度合いの違いにより、接続される電池間に充電量の違いが発生

【対策】

単電池過電圧防止のための端子電圧監視
各電池の充電度均等化のための均等充電

↓
電池システム規模が大きくなると複雑化

フロー電池

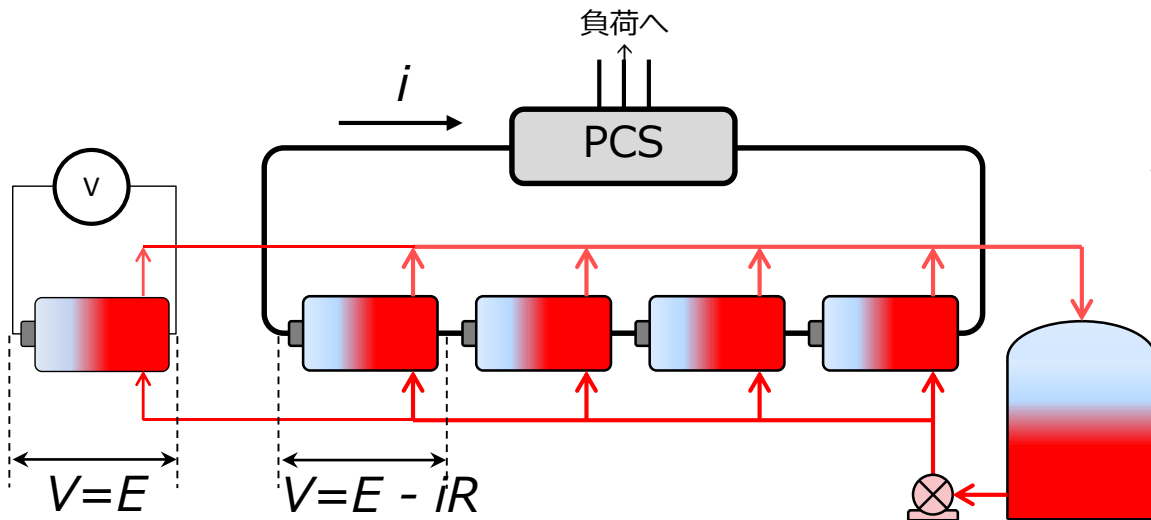


同一タンクから各セルに共通の電解液を供給することから、各セルの充電状態は常に等しい

- ↓
- 単セルの端子電圧監視不要
 - 均等充電不要

- ↓
- 運用が容易
 - 大型化が容易

4.3. 充電残量の計測が可能



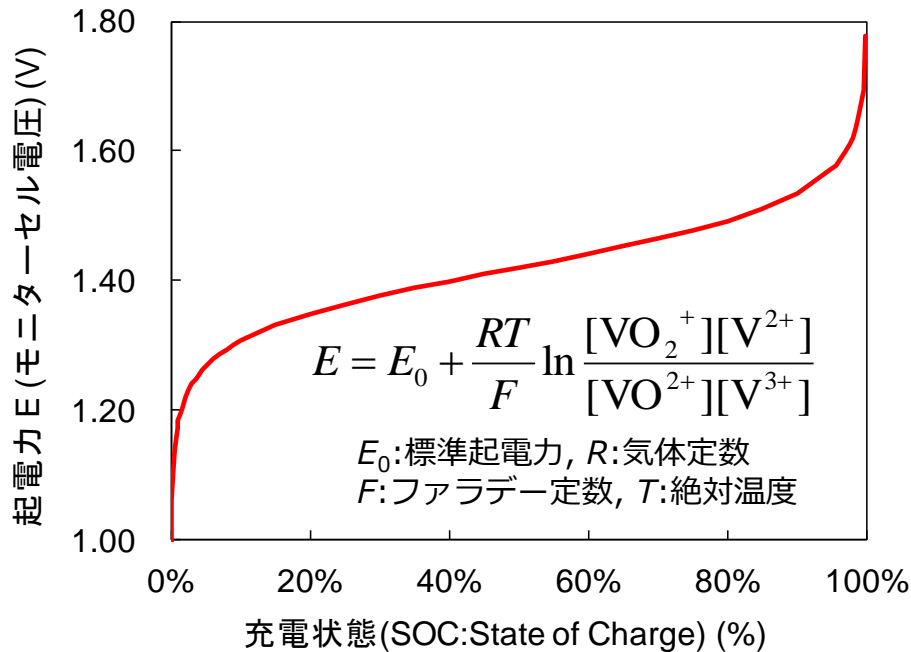
フロー電池では充放電中でも、起電力の測定が可能

↓
起電力と充電状態はNernstの式に従う

↓
充放電中の充電残量を正確に測定可能

↓
充電残量をフィードバックしての制御フローを組める

↓
自然エネルギー対応、システム安定化等の複雑な充放電に適する



4.4. 高い安全性

不燃性 難燃性

活物質は不燃物質、構成材料は難燃材料であり、火災の危険性は極めて低い。

- 電解液：硫酸バナジウム水溶液を使用(有機溶媒等を用いていない)
→ 不燃性
- セルの内部短絡が発生しても、燃えない
← 正負の電解液が混ざっても自己放電となるだけ。発火しない。
- セルスタック、配管は、塩化ビニルで構成
→ 塩ビ自体が難燃性(着火温度455℃)で火災の危険性は少ない。
酸素指数(燃やすのに必要な酸素濃度)は空気中の酸素濃度(21%)より大きく、大気中では自己消火性となる。

消防法

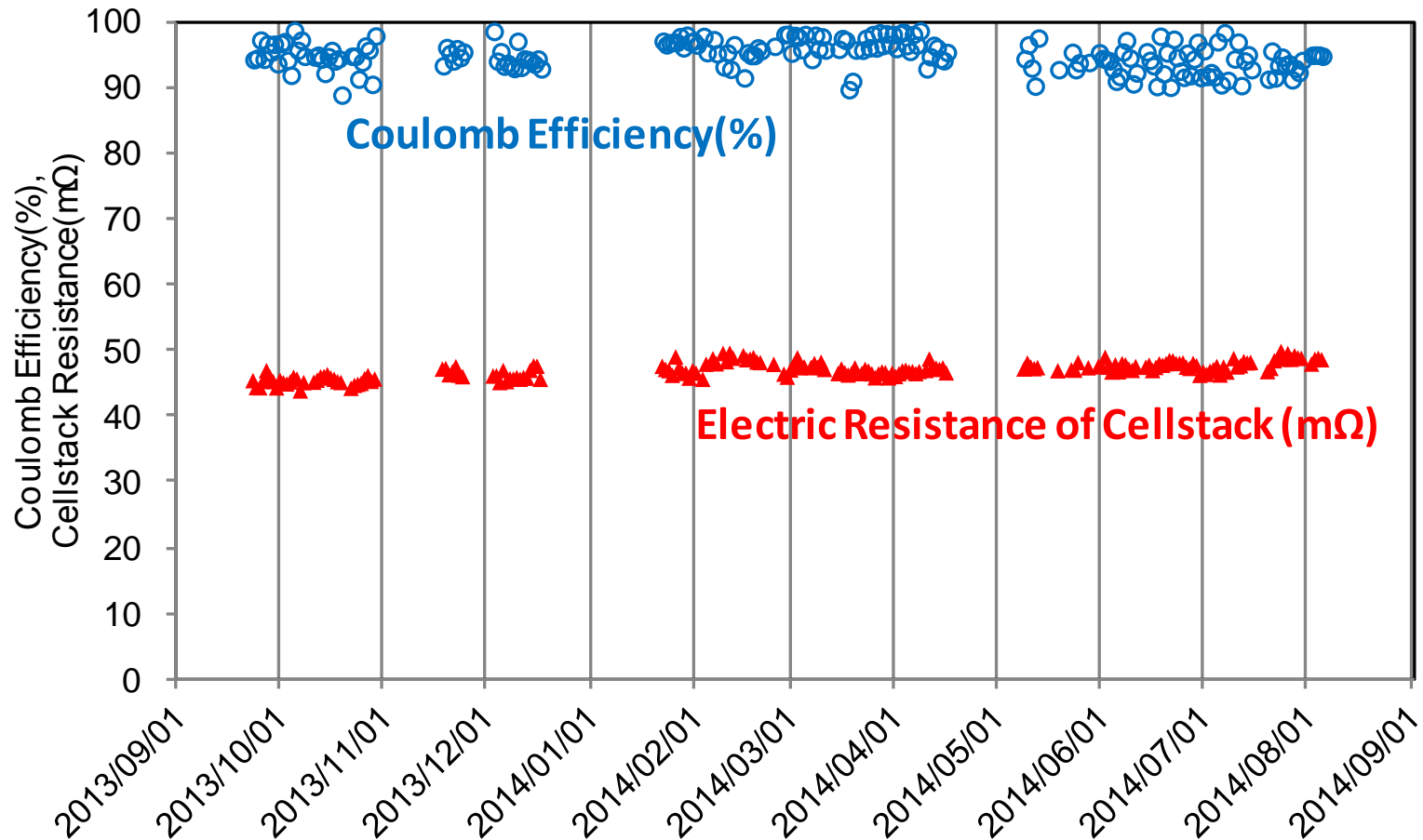
消防法上の危険物に該当せず、設置にあたっての消防法手続きは、下記の届け出のみ。

- 火災予防条例「蓄電池の容量の合計が4,800Ah・セル以上となるときは、専用不燃区画に設置する必要があり、設置届出を所轄の消防署に提出する必要がある」(火災予防条例準則第11条、13条)

活物質が危険物に該当しないため、設備の設置にあたり、危険物取扱所としての許可申請、予防既定の制定、危険物保安監督者等の選出は不要

4.5. 長期信頼性

- ✓ 原理上、電解液の劣化なし。
- ✓ セルスタックの構成部材に耐酸性材料を適用し20年間の設計寿命。
- ✓ 実設備での連続充放電試験(運転期間1年の例)において、性能の劣化兆候認められず。



4.6. レドックスフロー電池の特徴まとめ

項目	特徴
1. 長寿命	<ul style="list-style-type: none">● 充放電サイクル数に制限なし。● 電解液は何度も再使用が可能。
2. 安全	<ul style="list-style-type: none">● 電解液は水溶液で不燃。● 危険物は使用していないため、蓄電池の発火リスクは極めて低い。● 設備が損傷するような大災害時も火災、有害ガス発生リスクは低い。● 設置時の行政許可、届出が容易。
3. 運転自由度大	<ul style="list-style-type: none">● 短周期、長周期の複合されたような運転でも、充電状態を正確に把握しながら安全に稼働が出来、かつ充放電サイクルによる寿命の短縮もなし。
4. 運用が容易	<ul style="list-style-type: none">● 常温動作で運転/停止も容易。● セルの充電量均等化や充電量計測値リセット等の保守が不要。
5. 設計自由度大	<ul style="list-style-type: none">● 出力(kW)と容量(kWh)を独立に設計可能。● 大型化、大容量化が容易。

<短所> ● エネルギー密度が小さい

5.1. レドックスフロー電池の開発の歴史

1949 1974 1980 1985 1989 2001 2010

● ドイツ特許(Cr/Cr系)

● NASAフロー電池原理発表、US特許



1973 NASA

● NEDOムーンライト計画「新型電池電力貯蔵システム」

RF(電総研/三井造船), NAS(ユアサ電池), Zn/Br(明電舎), Zn/Cl₂(古河電工),
電総研1kW('82), 三井造船 60kW('84)

● NEDOサンシャイン計画 太陽光発電用として研究 (三井造船、荏原製作所)

● (濠)NSW大学 V/V系フロー電池発表、基本特許('86)

● 電総研/鹿島北共同発電

煤からのV利用研究としてフロー電池開発
荏原1kW('90), 三井10kW('91), 鹿島北200kW('97)

● 関西電力/住友電工

Fe/Cr系60kW('89), V/V系450kW('96)

● 住友電工 V/V系を実用化

数100kW級にて負荷平準、非常用、瞬低補償等)



1985 NSW大学

2005年にエクスパイヤー

● 米欧中をはじめとして
世界中で開発進展中

5.2. 電力貯蔵装置、レドックスフロー電池の標準化

電力貯蔵システム全般について



TC120 “Electrical Energy Storage (EES) Systems”

- Terminology
- Unit parameters and testing methods
- Planning and installation
- Guidance on environmental issues
- Safety considerations



電力貯蔵用電池規定 (JEAC 5006-2014)

レドックスフロー電池に特化



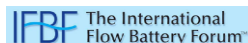
TC21 JWG7 “Flow Battery System for Stationary Applications”

- Performance general requirements & methods of test
- Safety Requirements
- Terminology and general aspects



CWA 50061

“Flow batteries – Guidance on the specification, installation and operation”



6. フロー電池の適用事例

電力会社

- 周波数制御
- 余剰電力対応

サービサー、PPS

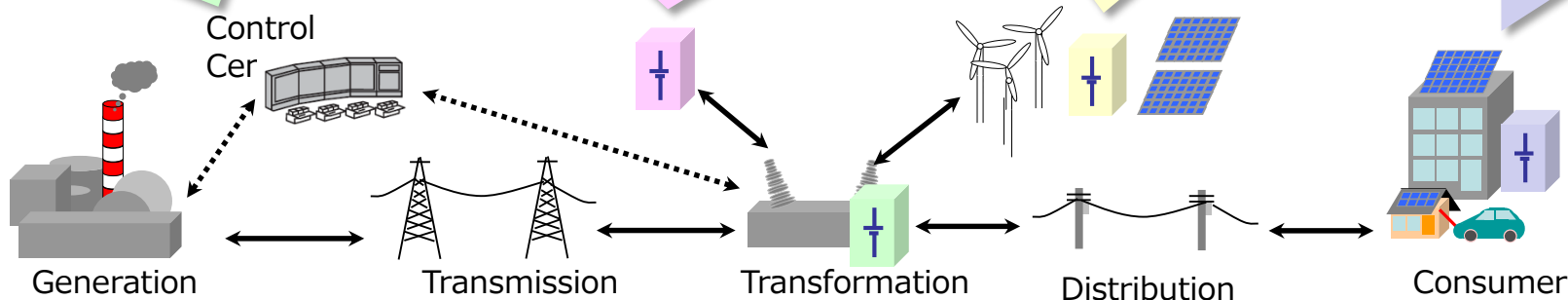
- Ancillary Service
- Frequency Regulation

IPP

- 出力短周期平滑化
- 計画運転

需要家

- ピークカット - UPS
- 非常用電源 ...



系統用



15MW, 60MWh
短周期変動抑制、長周期変動抑制
余剰電力対応 等

風力発電事業者用



4MW, 6MWh
ウィンドファーム出力平滑化

マイクログリッド



500kW, 3MWh
エネルギー利用のスマート化
ピークカット、非常電源

6.1. 系統用蓄電池

経産省による国内プロジェクト



レドックスフロー電池

定格出力 15MW
最大出力 30MW
定格容量 60MWh
2015/12 運開



TOSHIBA

リチウムイオン電池

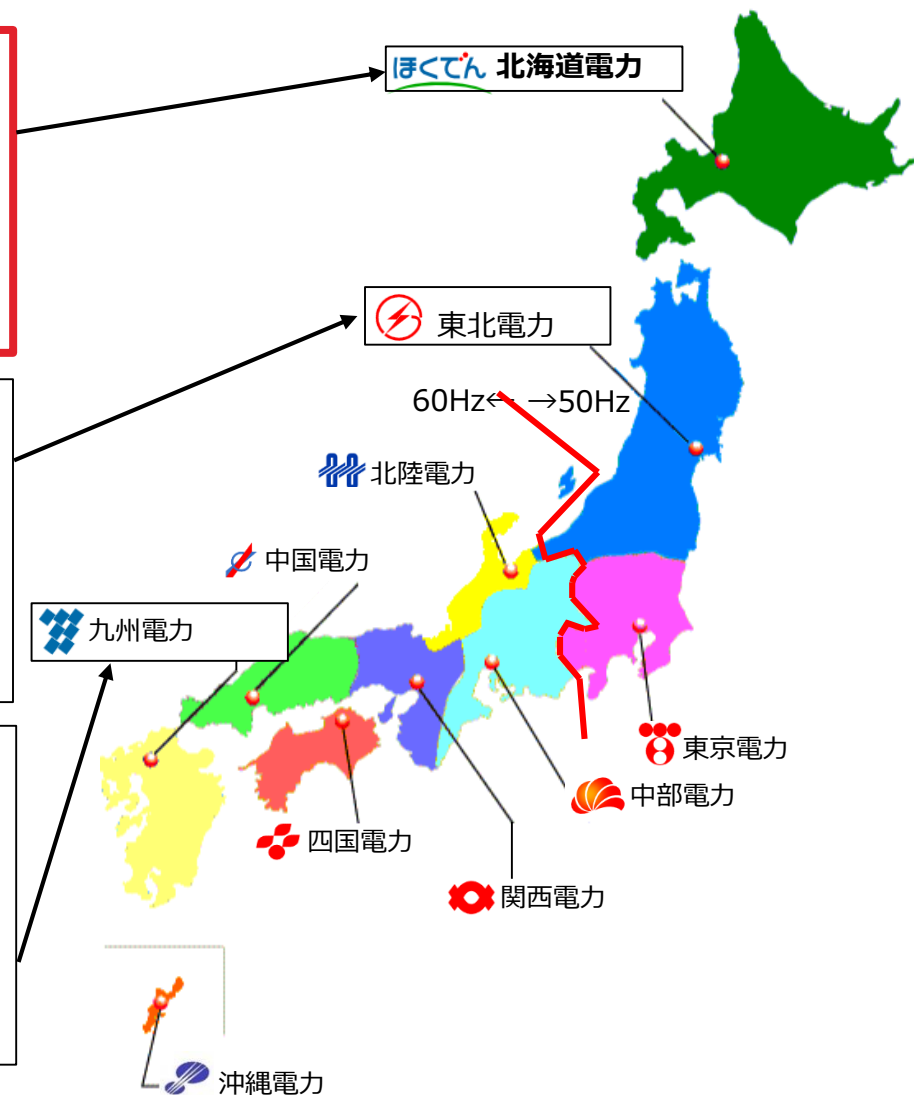
定格出力 20MW
最大出力 40MW
定格容量 20MWh
2015/2 運開



NAS電池

定格出力 50MW
定格容量 300MWh

2016/3 運開



6.1.1. フロー電池による系統用蓄電池実証事業の概要

- 蓄電設備：レドックスフロー電池設備 (15MW, 60MWh)
- 経済産業省(METI)殿 実証事業
- 実施者：北海道電力殿と住友電工の共同事業
- 実証目的：風力発電や太陽光発電の出力変動に対する新たな調整力としての系統用蓄電池の性能実証および制御技術の開発
- 竣工：2015年12月25日

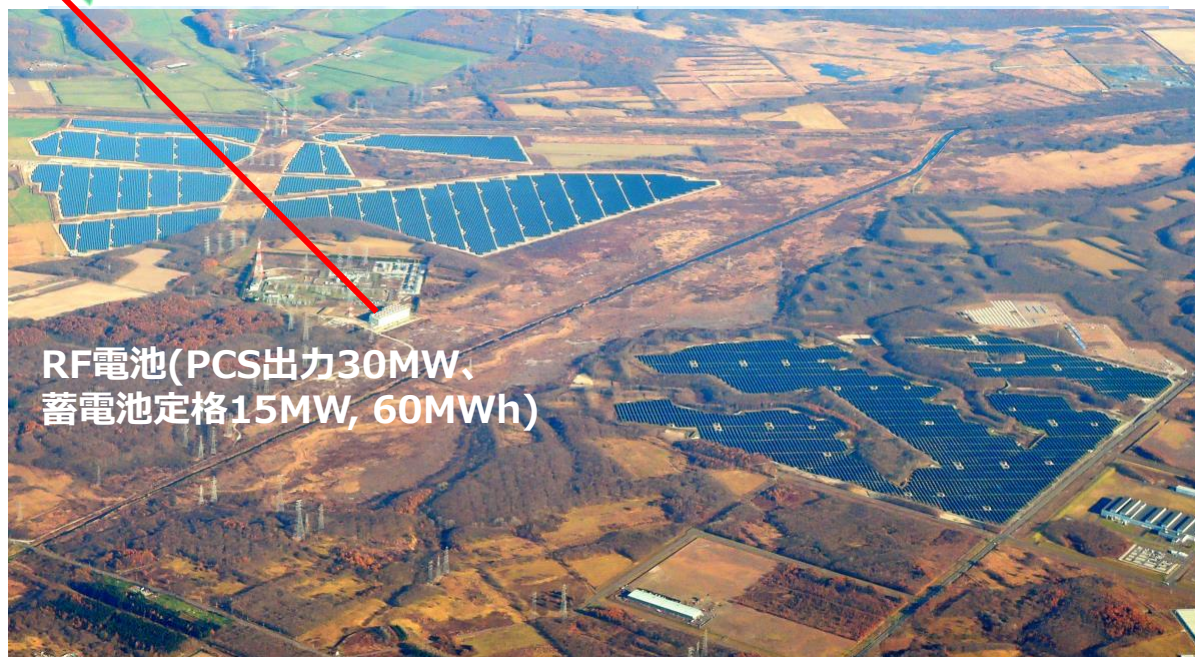


6.1.2. 蓄電池規模と設置場所



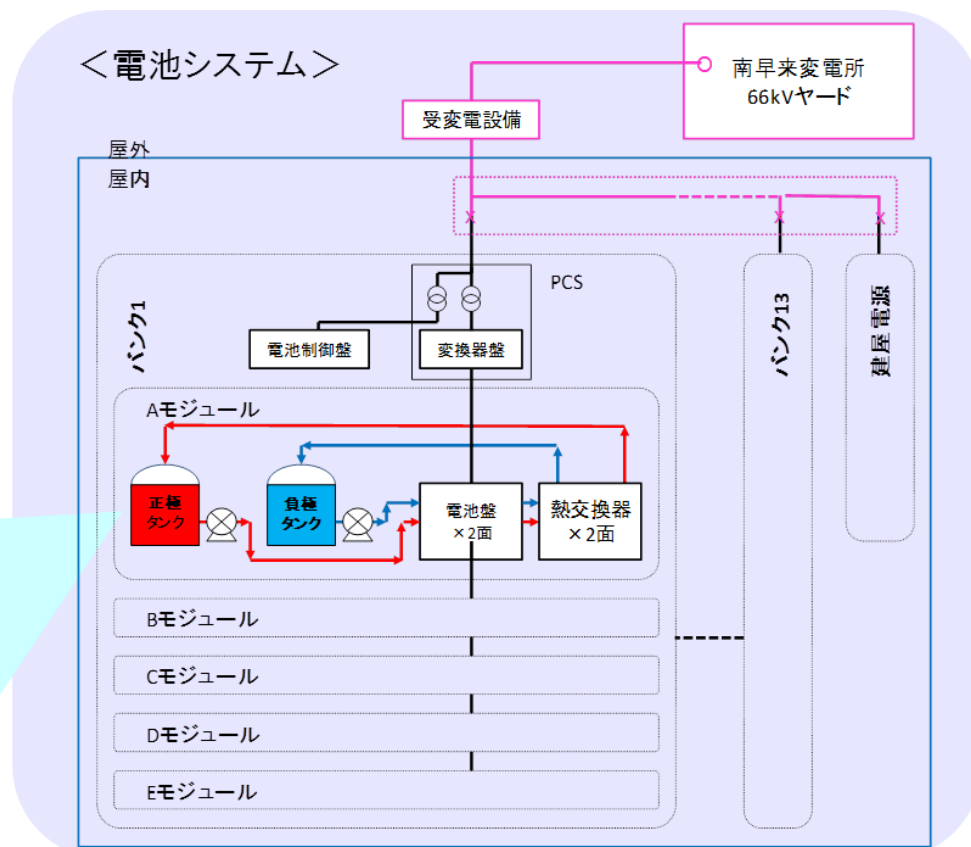
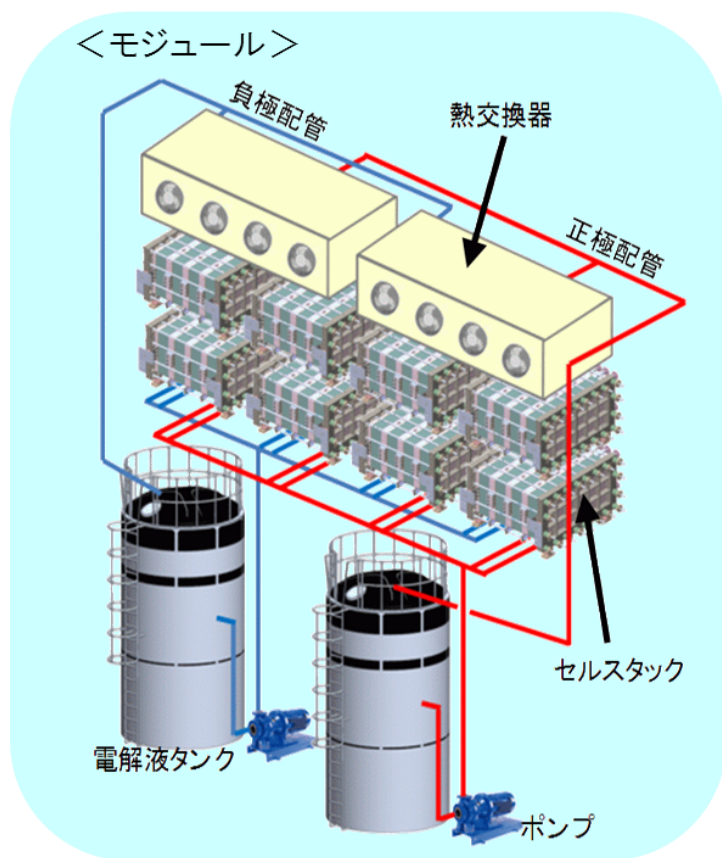
南早来変電所 (275kV道央ループシステムの基幹系変電所)

出力	RF電池定格:15MW PCS定格:30MVA
容量	60MWh (15 MW x 4 Hour)



6.1.3. システム構成

- 電池盤2面(セルスタック8台内蔵)、熱交換器盤2面、電解液タンク2基、ポンプ2台、および配管により、電池の最小単位(モジュール)を構成。
- 5組のモジュールと交直変換装置(PCS)により出力制御の最小単位(バンク)を構成し、電池システムは13バンク(65モジュール)により構成。



6.1.4. システム外観



2階

電池盤 x 130面
熱交換器 x 130面
電池制御盤(BMS) x 13面



1階

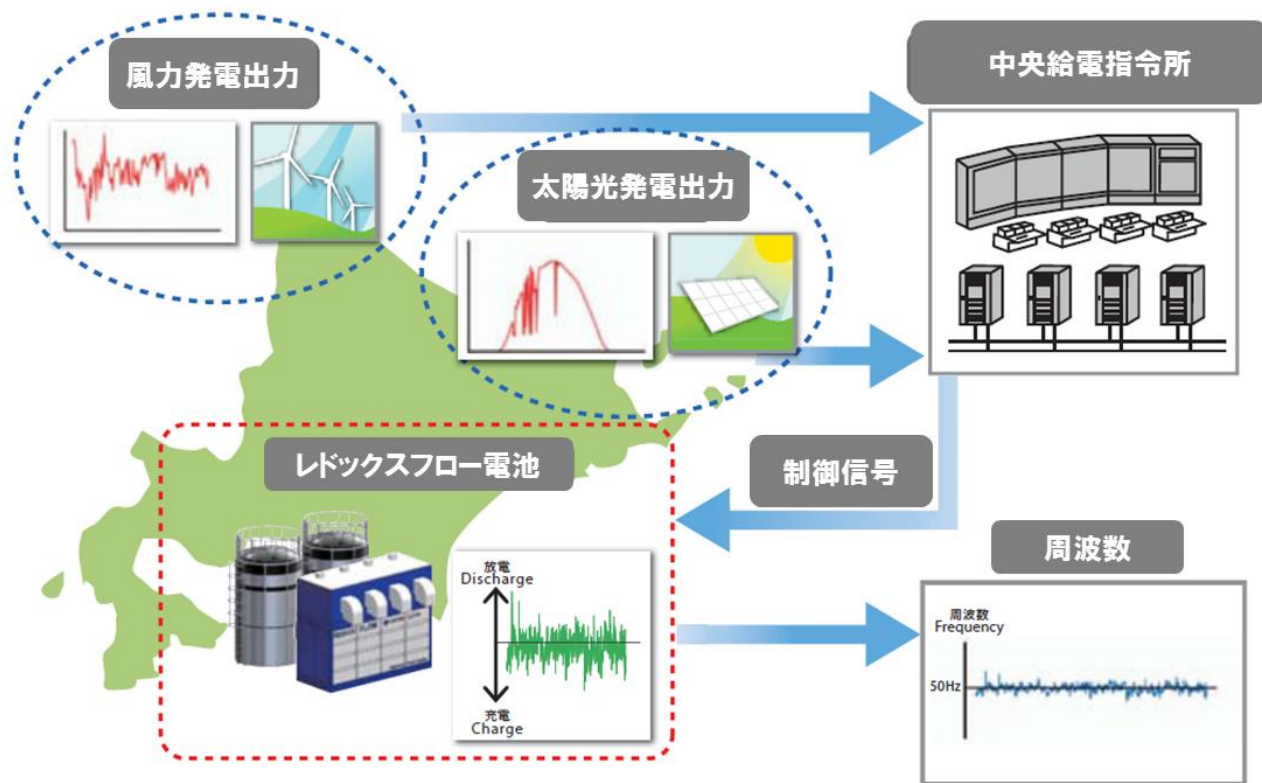
交直変換装置(PCS) x 13式
電解液タンク x 130基
(正負合計)
電解液ポンプ x 130台
(正負合計)

6.1.5. 実証試験の目的

レドックスフロー電池の特長を活かして、
 「短周期変動抑制制御」「長周期変動抑制制御」「下げ代不足対策運転」
 および「短・長周期ハイブリット制御」の各制御手法開発、ならびに制御
 ロジック・パラメータ等の最適化を図る。

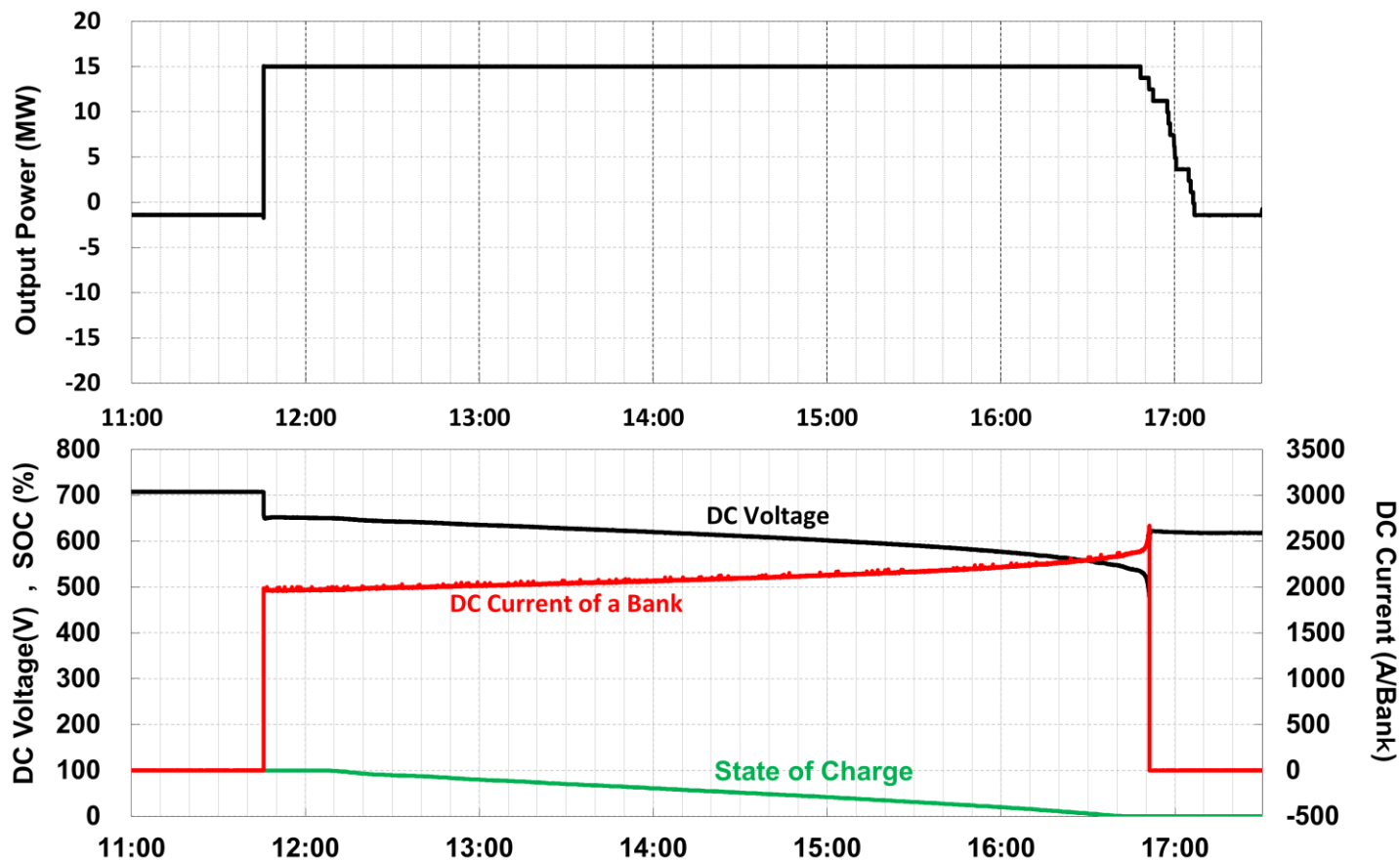
制御手法

短周期変動抑制制御	風力・太陽光発電の変動補償制御
	ガバナフリー相当制御
	負荷周波数制御(LFC)
長周期変動抑制制御	
下げ代不足対策運転	
短・長周期ハイブリット制御	



6.1.6. 現地調整試験結果例 (1)容量試験

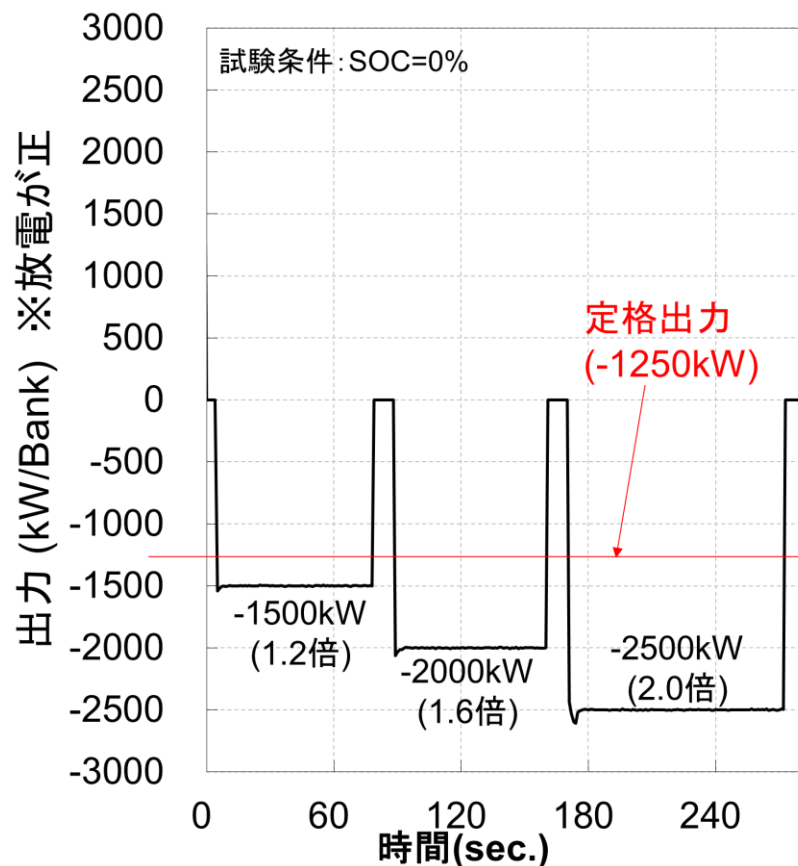
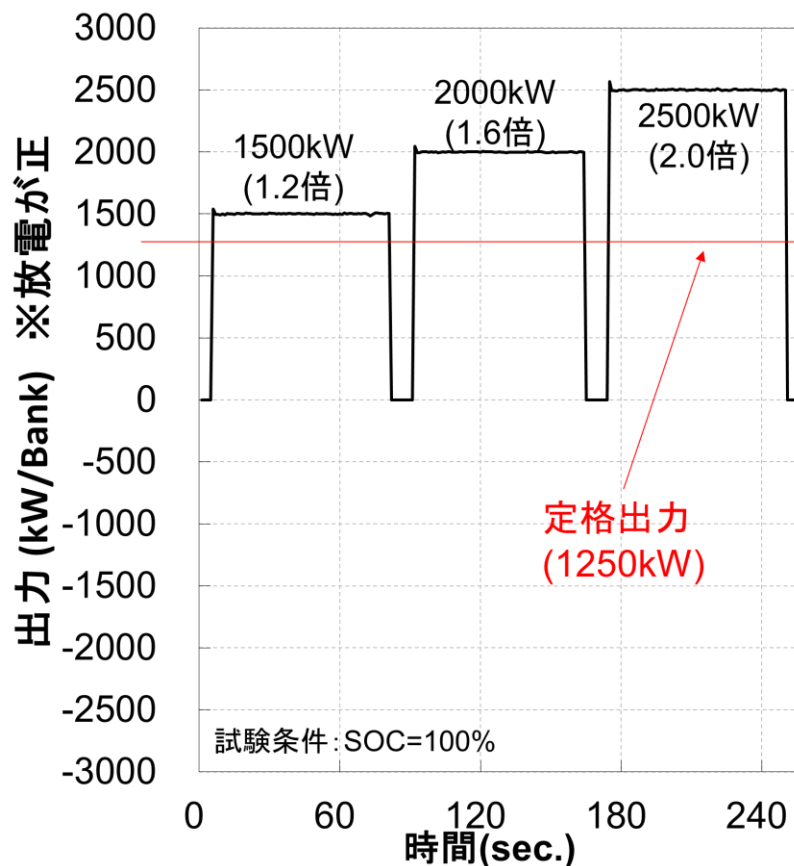
✓ 13バンク総合にて定格放電容量60MWh以上の初期性能を確認。



総合容量確認試験結果

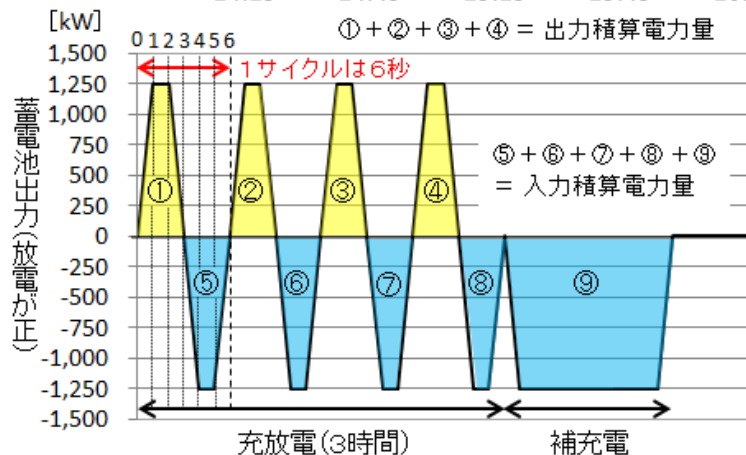
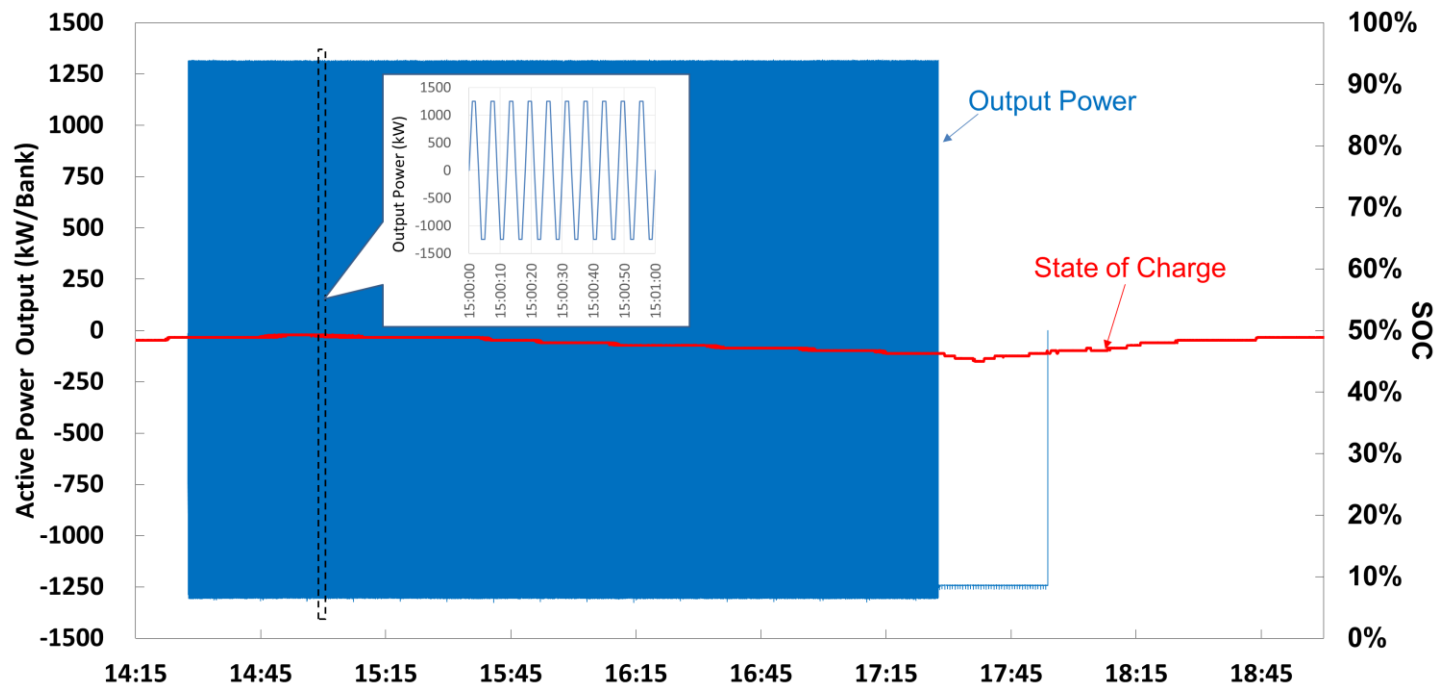
6.1.6. 現地調整試験結果例 (2)高出力特性測定例

13バンク全てにおいて、SOC15~50%の領域では、短時間であれば充放電いずれの方向にも、2倍高出力(2500kW=1,250kW×2)運転が可能であることを確認(60秒以上出力できる場合は、試験を打ち切り)。



6.1.6. 現地調整試験結果例 (3)システム効率測定例

短周期変動を模擬した充放電波形をモデル化し、システム効率を測定



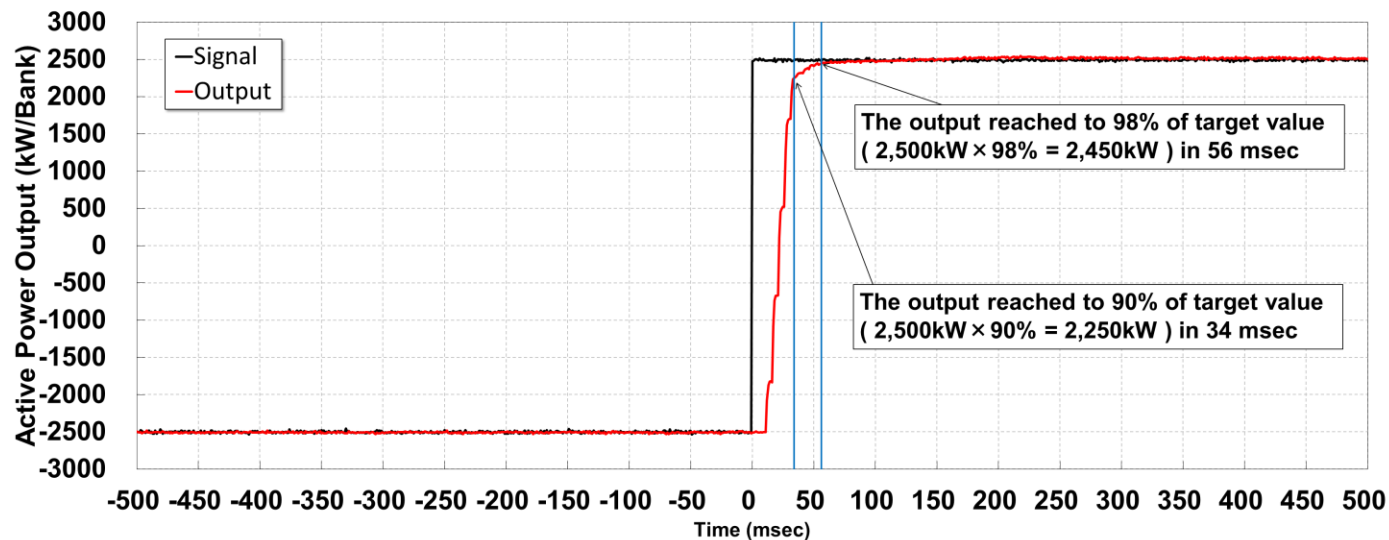
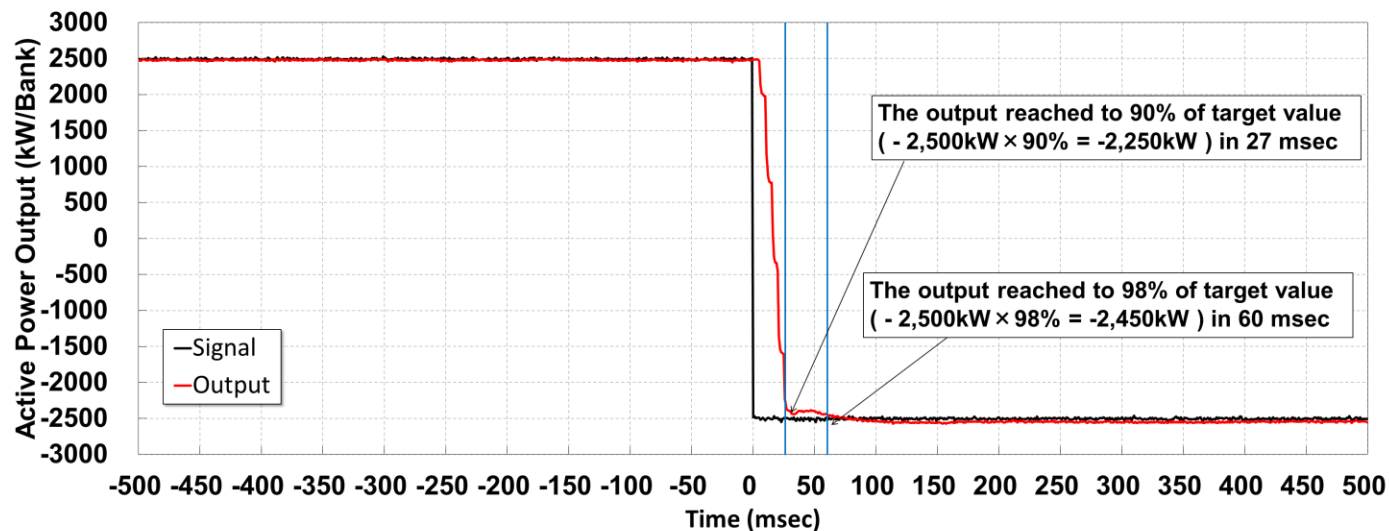
連系点にて入出力電力を測定し、補機動力を含めたシステム効率を測定

全充電電力量 = 1264.9kWh + 543.2kWh

全放電電力量 = 1298.4kWh

システム効率 = 全放電電力量 / 全充電電力量
= 71.8%

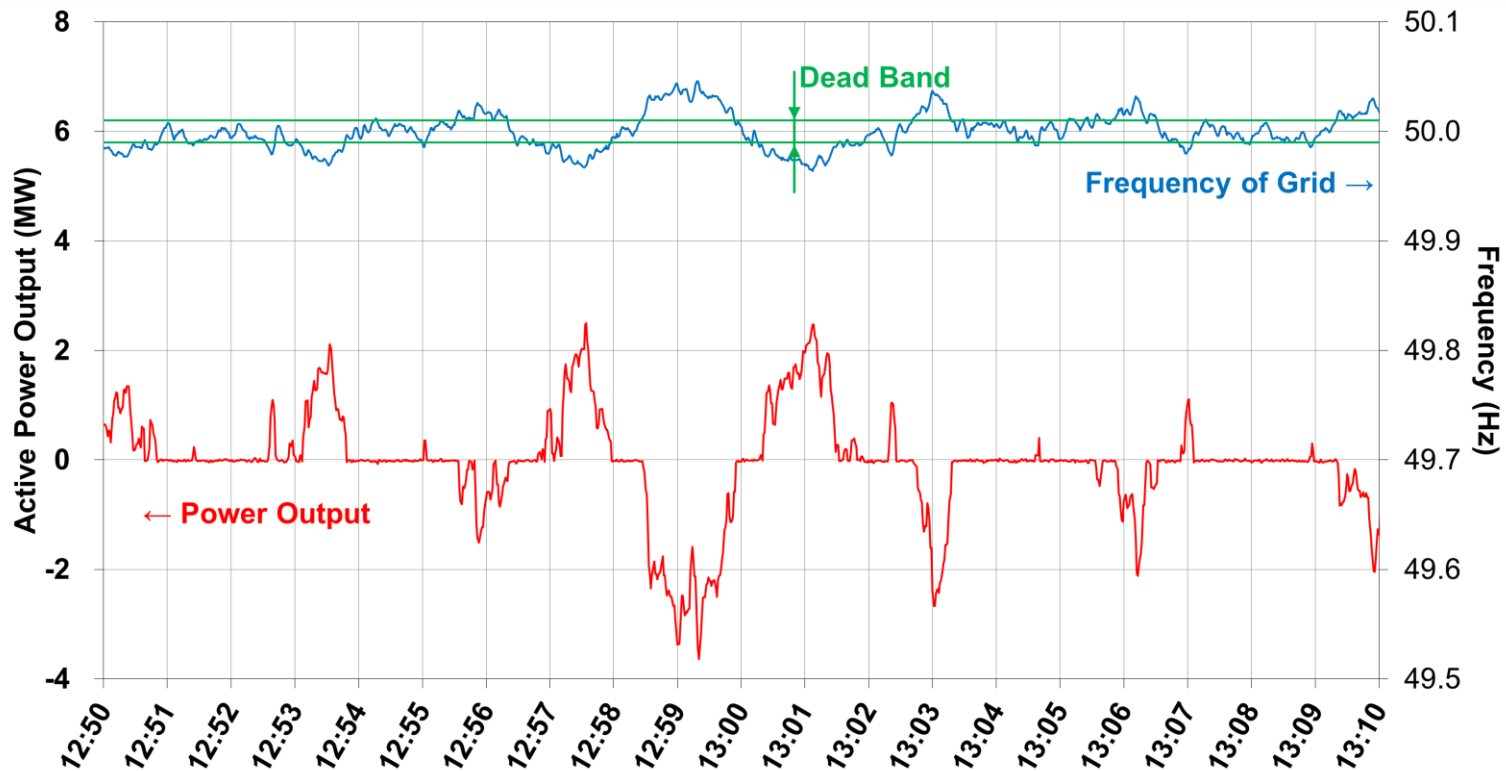
6.1.6. 現地調整試験結果例 (4)高速応答性



応答速度は、PCSの応答時間、通信が律速。
蓄電池は、レドックスフロー電池に限らず、高速応答が期待できる。

6.1.6. 現地調整試験結果例 (5)ガバナフリー相当制御

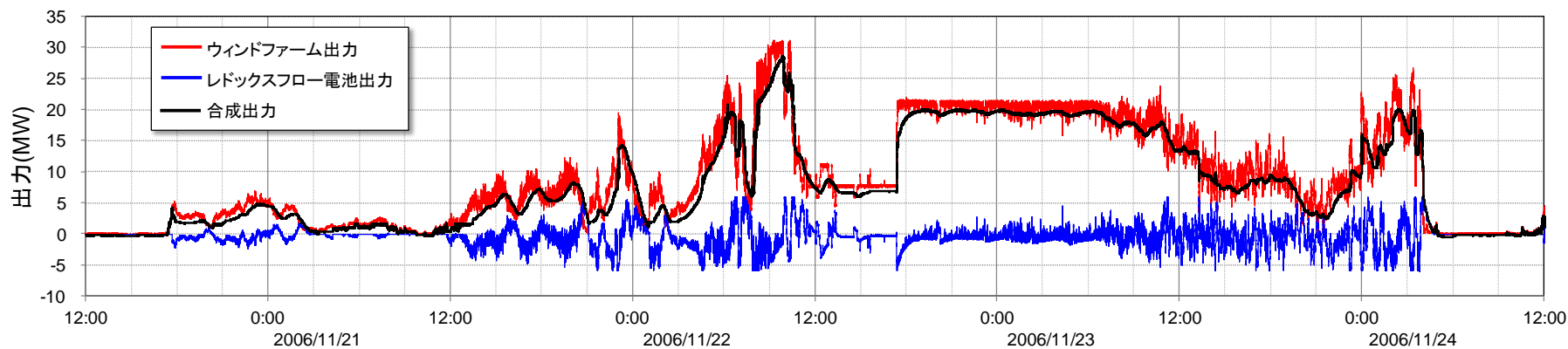
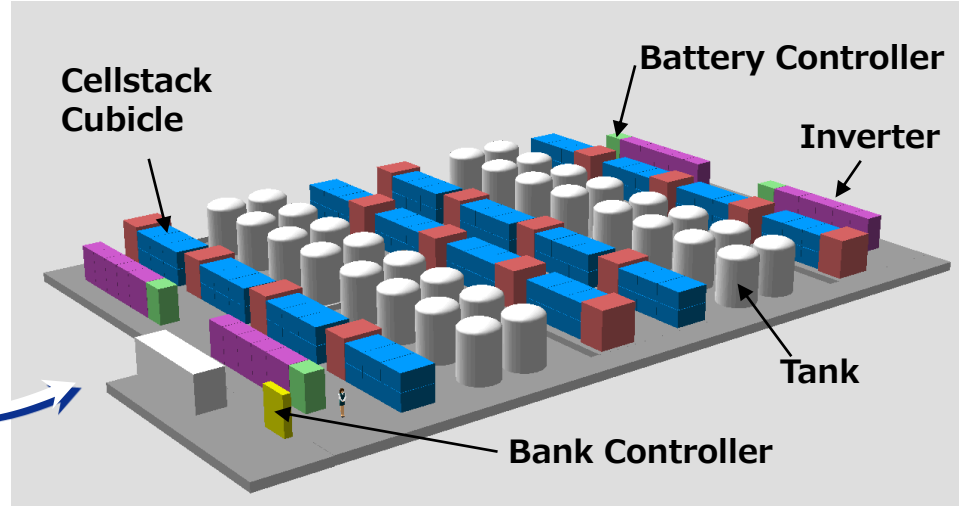
蓄電池システムにて自律的に周波数を検出して、蓄電池出力を決定



今後、他電源との制御速度の協調やSOC変化幅等を評価しながら、最適となる制御方式を検証・構築していく。

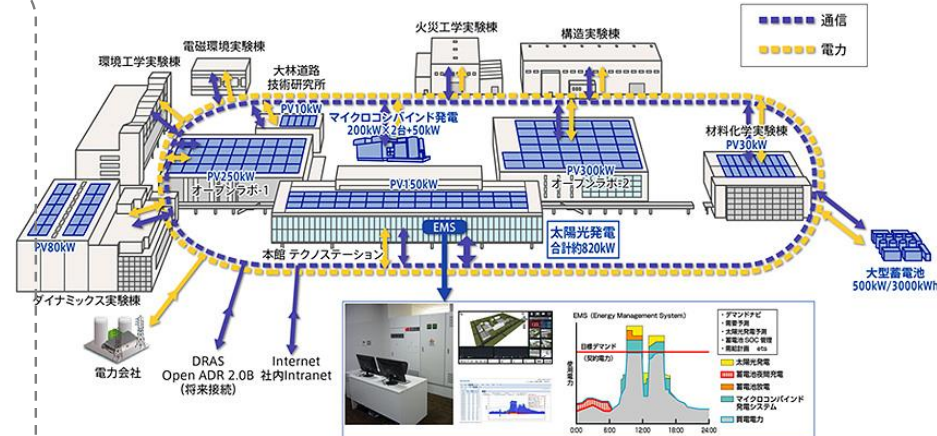
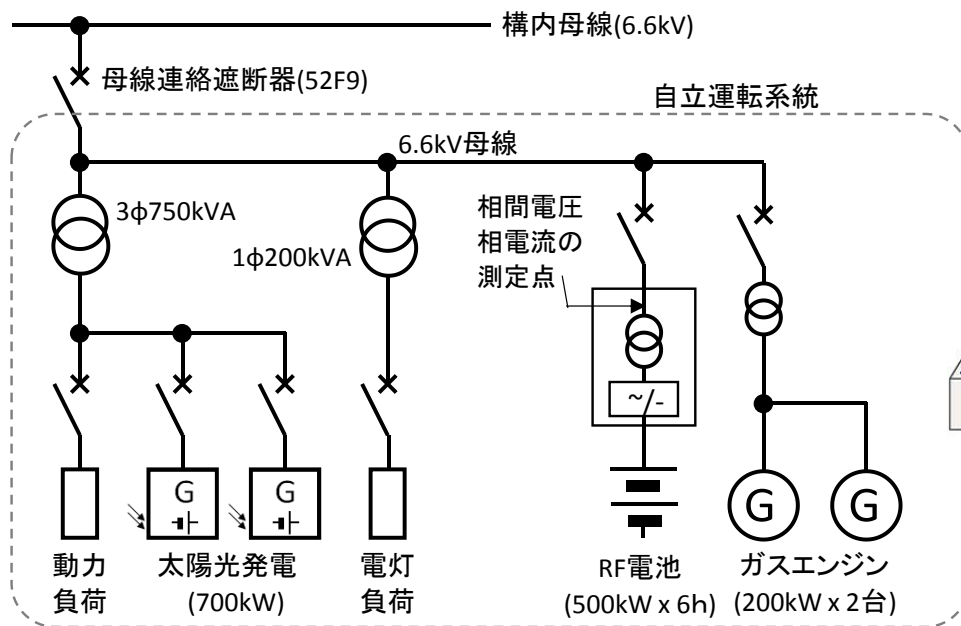
6.2. 風力発電事業者向けの適用事例

- 2005/1～2008/2 (NEDO事業) 短周期平滑化
- 苫前ウィンビラ発電所(JPower殿)に併設(風力発電機19基、全出力30.8MW)
- RF電池出力定格 : 6MVA = 1.5MVA x 4 Bank (6,600V, 50Hz 連系)
- RF電池容量 : 6MWh = 1.5MWh x 4 Bank

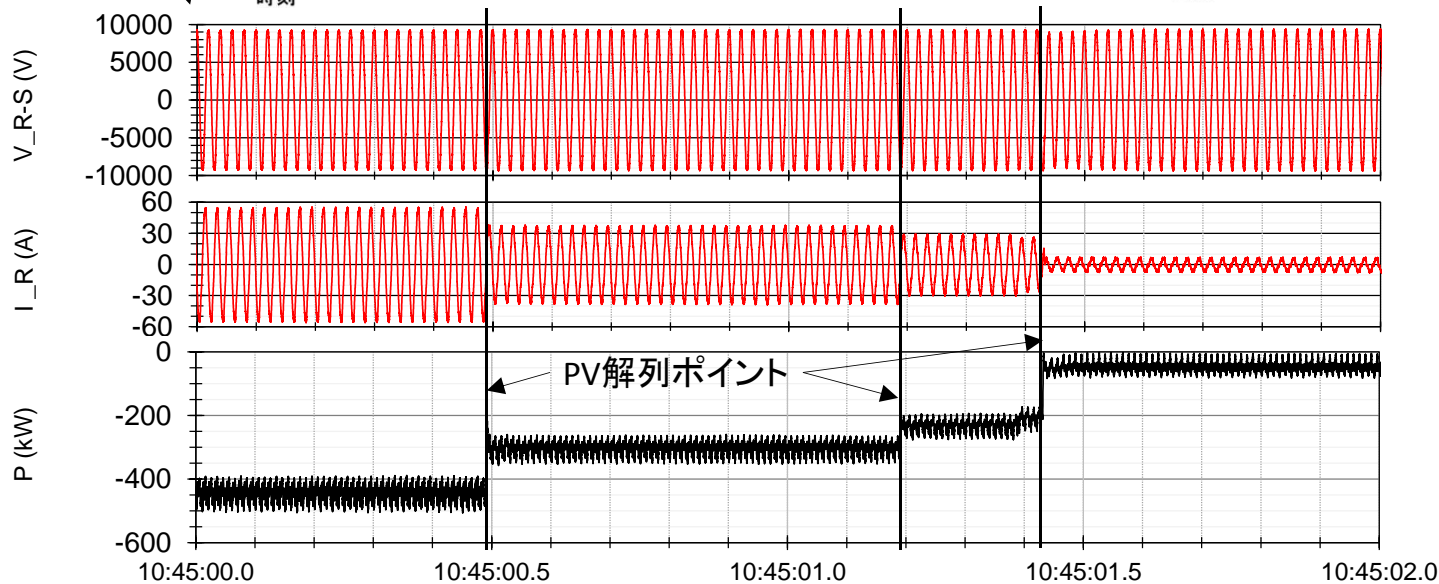
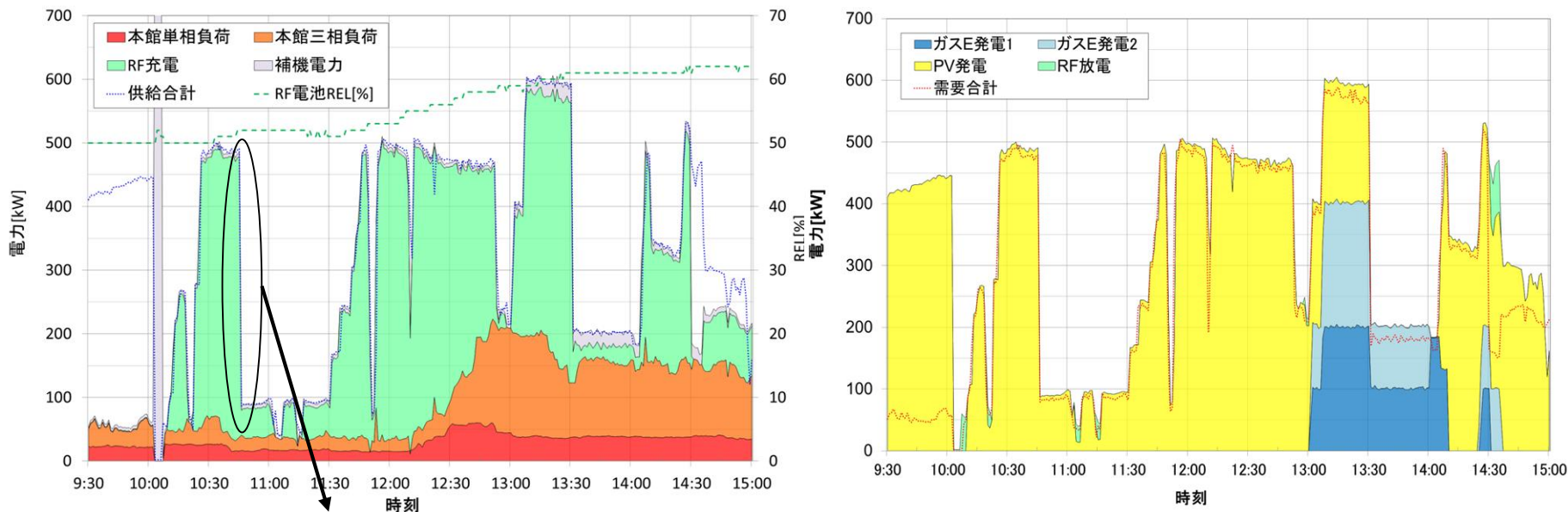


6.3. マイクログリッドへの適用事例

- 用途
 - ピークカット
 - BCP 非常用電源(Black Startあり)
- マイクロコンバインドガスエンジン、太陽光発電併設
- 3MWh (500kW x 6H)
- 2015/1~



6.3.1. 非常用電源(自立電源)の運転例



6.4. 需要家への適用検討事例

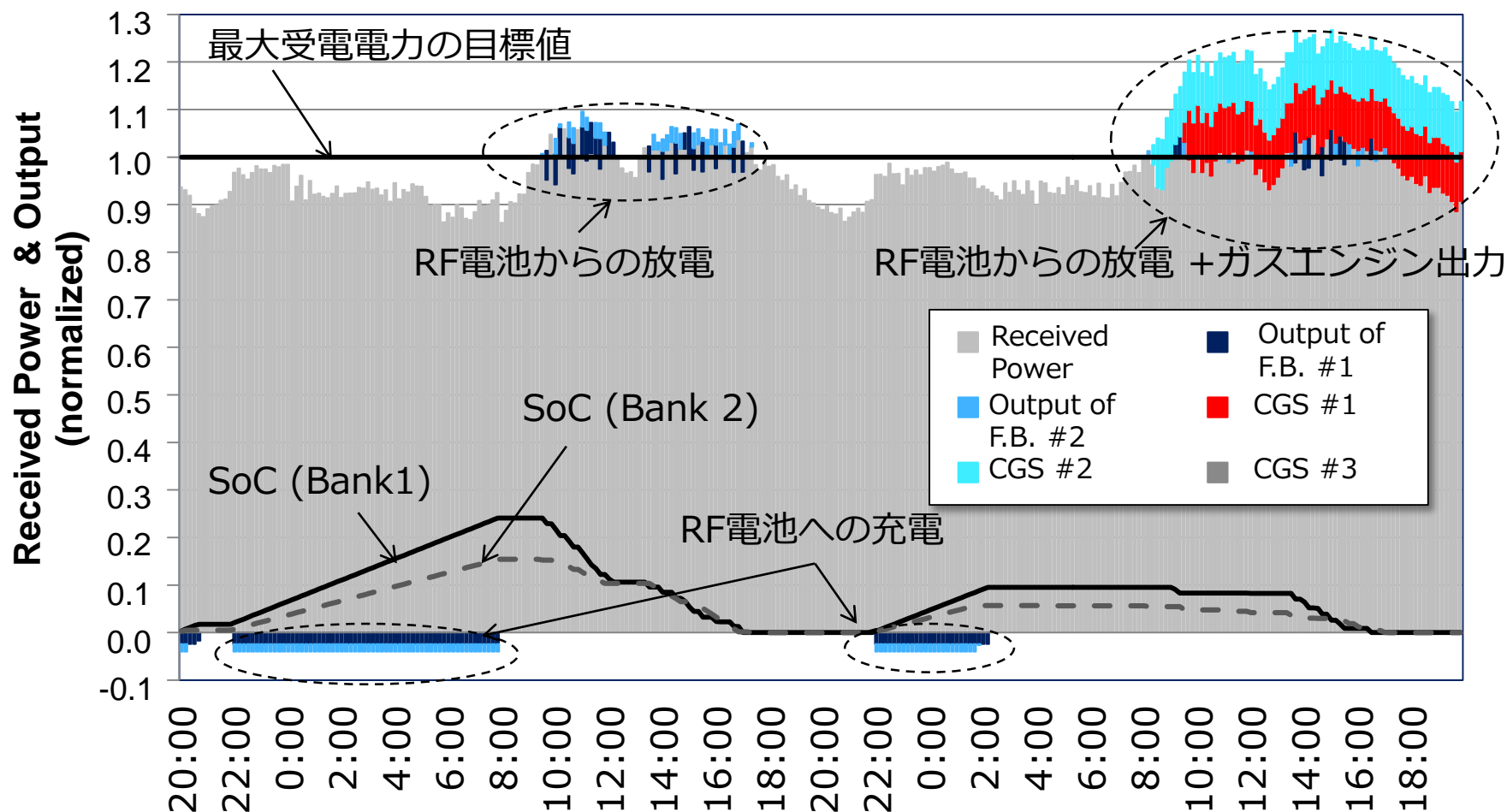


レドックスフロー電池	最大出力：1MW 蓄電容量：5MWh
集光型太陽光発電	最大出力：100kW (7.5kW x 15基)
受配電盤	1.2MVA
EMS	一式

実際の工場での電力利用
の中での実証運転

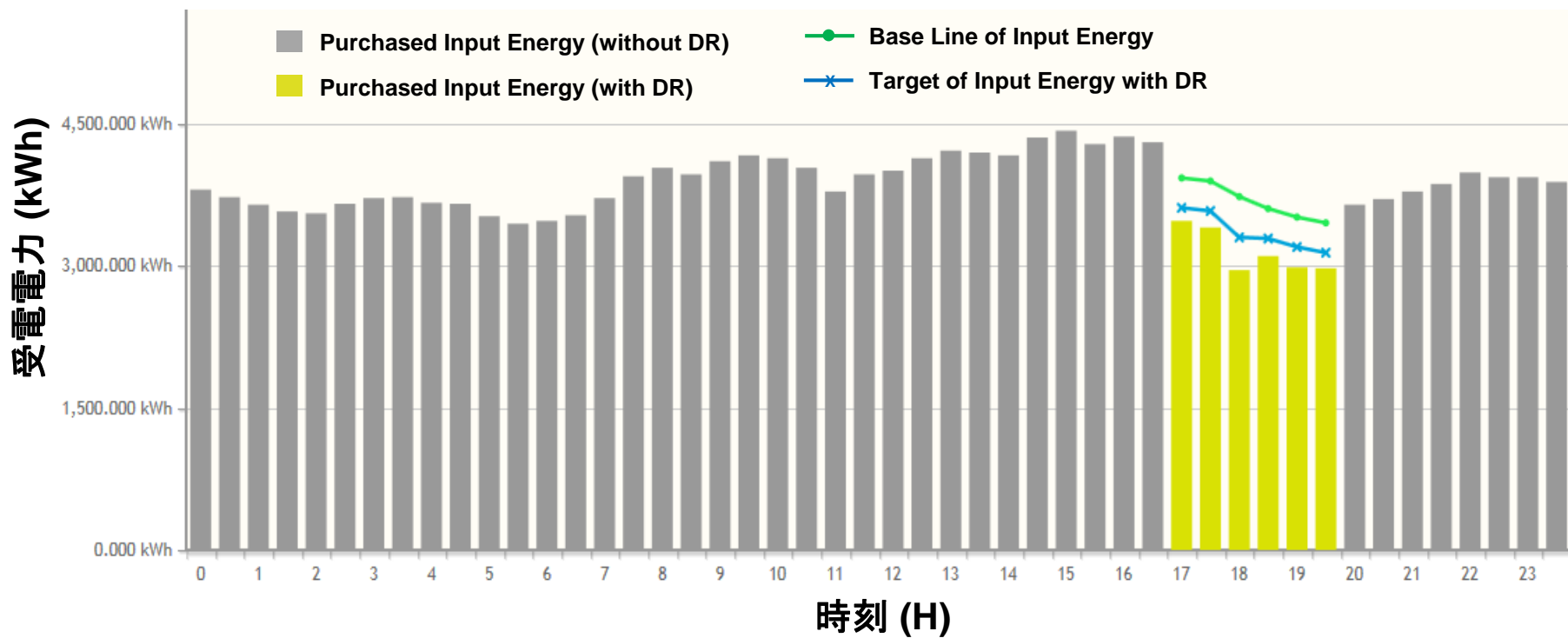
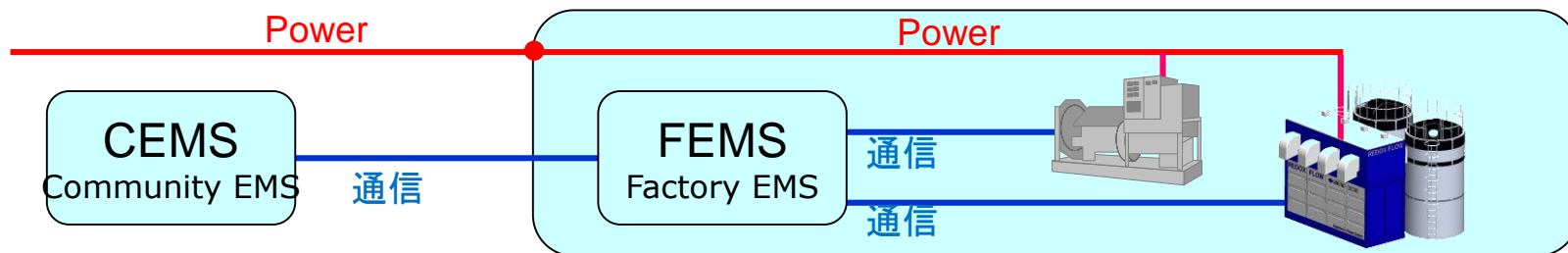
6.4.1. ピークカット運転例

運転条件：受電電力 < 最大受電電力の目標値
 コストミニマムになるように運転
 (電力料金、蓄電池ロス、ガスエンジン燃料費を考慮)



6.4.2. デマンドレスポンス運転例

デマンドレスポンスタイプ : CCP (Capacity Committed Program)



横浜スマートシティプロジェクトにて実施

7. 今後の課題と取組

(課題) 蓄電池の最大の問題はコスト



(取組)

性能up(同一セルで大出力化)によるコスト低減

オールインワン化による輸送コスト、設置コストの低減



(開発状況)

- 海上輸送用コンテナ内に、セルスタック、タンク、ポンプ、配管類を設置
(オールインワン化)
- 高出力セルの開発
(出力密度2倍化)
と、適用
- 従来システムと比較して、大幅に、
 - 輸送コスト
 - 設置コストを低減
- 社内にてシステムの信頼性評価開始



8. まとめ

- 以上、電力系統、需要家における蓄電ニーズを紹介したうえで、レドックスフロー電池の原理、特徴を示し、幾つかの適用事例を報告した。
- 技術的な検証については、各々の事例で、良い結果が得られており、実用化段階となっているものの、現時点の最大の課題は、コストである。
- 今後、引き続き低コスト化開発を進め、将来の電力の効率的な運用に貢献していきたい。

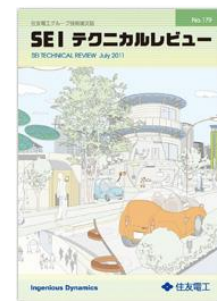
電気化学会エネルギー会議電力貯蔵技術研究会（編集）
「大規模電力貯蔵用蓄電池」



一般社団法人日本電気協会 発電電専門部会
JEAC 5006-2014「電力貯蔵用電池規定」



SEI テクニカルレビュー 2011年7月号 No.179
「電力貯蔵用用レドックスフロー電池」 重松
(URL <http://www.sei.co.jp/technology/tr/bn179/pdf/sei10674.pdf>)



SEI テクニカルレビュー 2013年1月号 No.182
「再生可能エネルギー安定化用レドックスフロー電池」 柴田
(URL <http://www.sei.co.jp/technology/tr/bn182/pdf/sei10742.pdf>)



ご清聴ありがとうございました



お問い合わせ先

 **住友電気工業株式会社**

エネルギーシステム事業開発部
TEL:(06)6466-5628

**Ingenious
Power
System**

Ingenious dynamics for the **smart** future.

