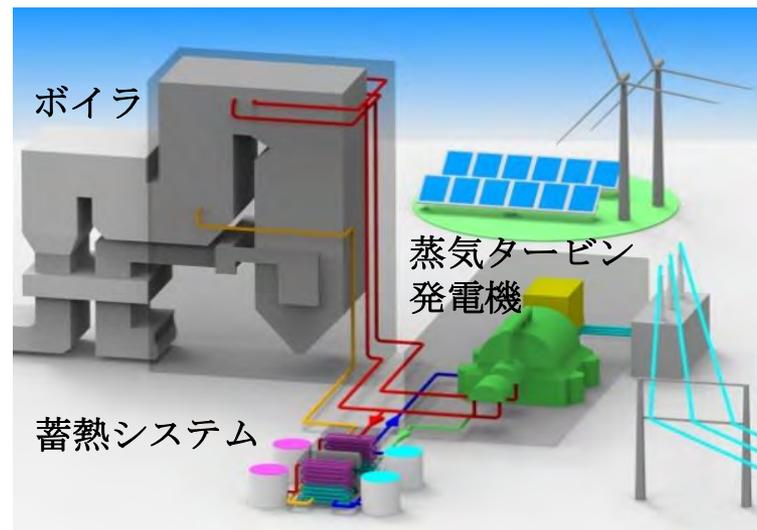


再エネ時代の高効率で大出力、低コストな 蓄熱システムの開発

第8回ESIシンポジウム 2020年9月3日

ボイラ技術総括部 山本健次郎
Mitsubishi Power, Ltd.

1. 再エネ時代の電力需給調整の課題
2. 蓄熱システムによる省エネ効果
3. 革新的PCM※の蓄熱材活用

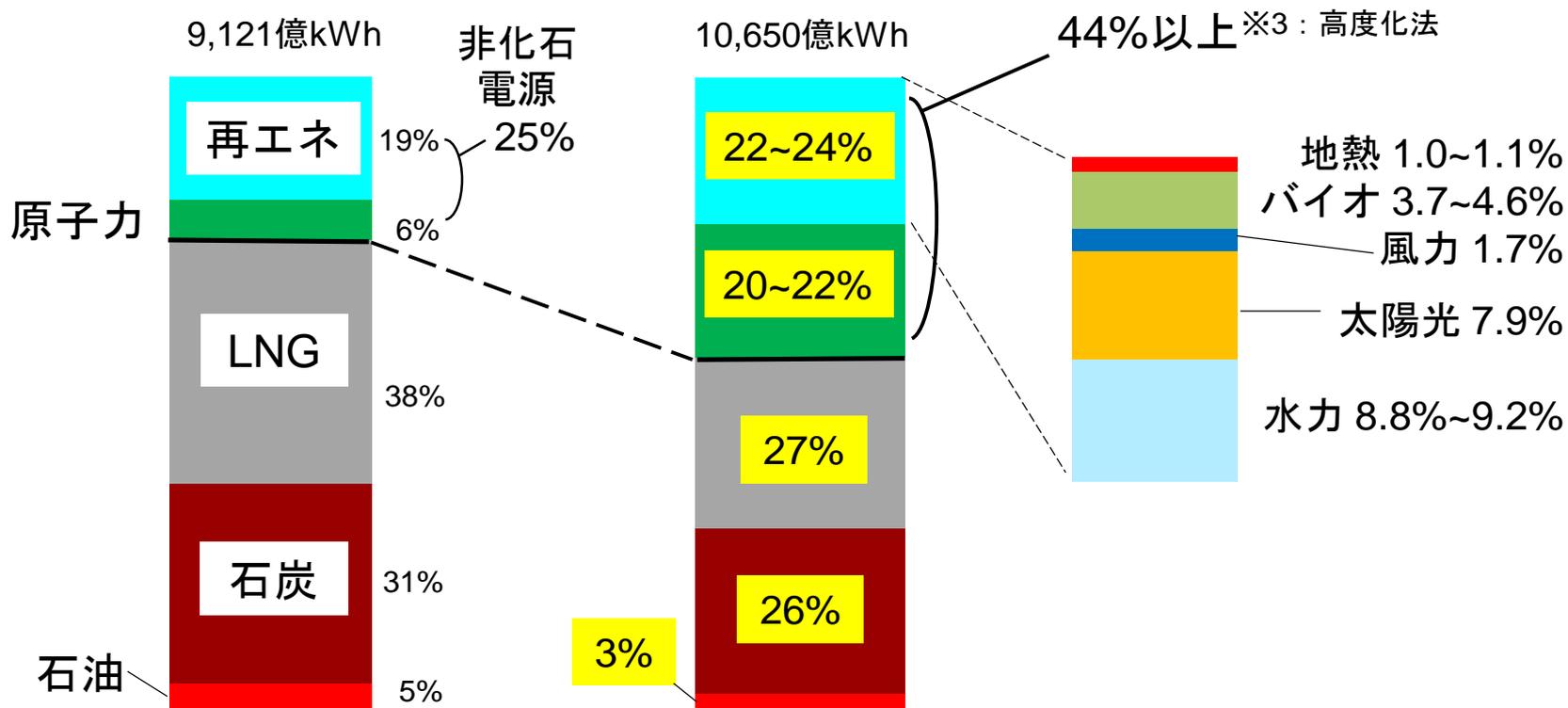


※ PCM(Phase Change Material):相変化による潜熱利用材

1-1. 再エネの伸長

エネルギー基本計画と高度化法に沿って伸長

2019年度	2030年度
OCCTO見通し※1	第5次エネルギー基本計画※2

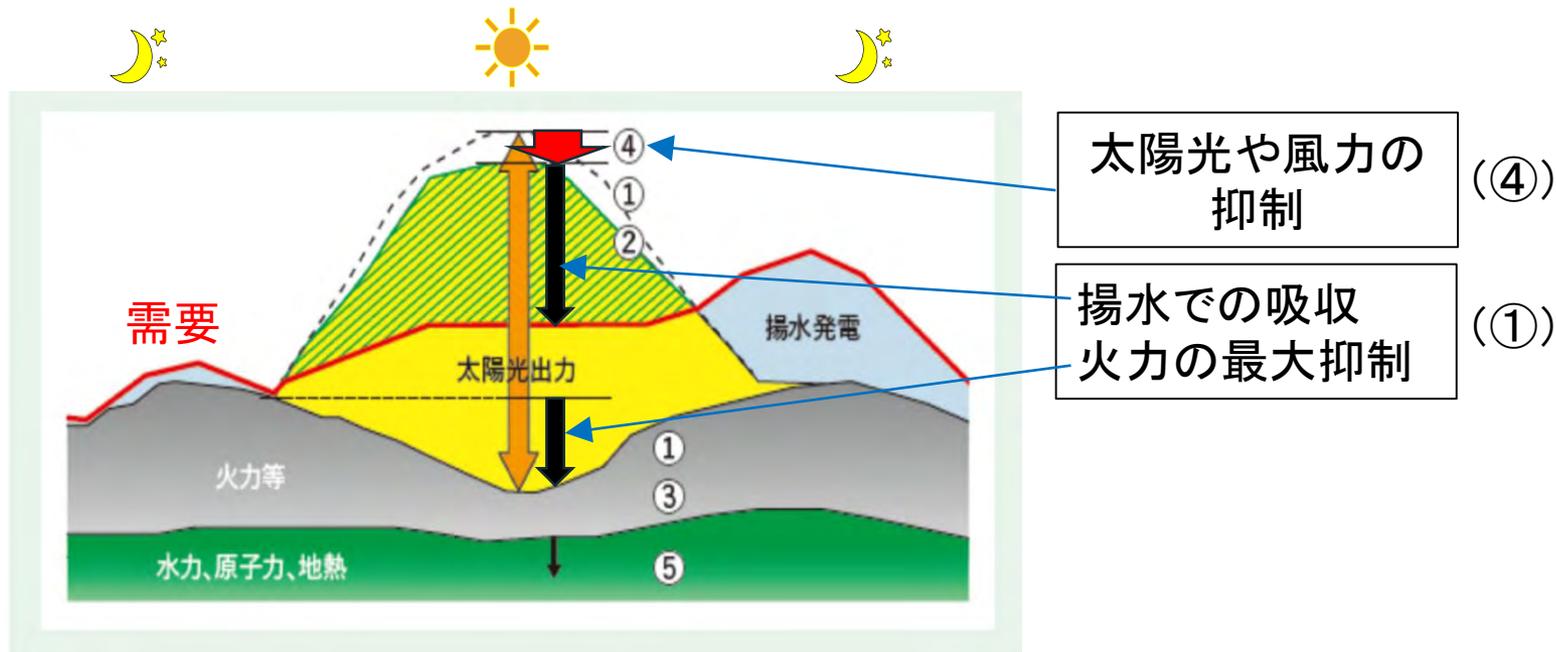


※1：電力広域的運営推進機関（OCCTO）2018年度報告書

※2：長期エネルギー需給見通し（2015年7月経産省）も参照

※3：エネルギー供給構造高度化法（2009年制定）第5条に基づく告示（2016年）

再エネの伸長が需給調整を上回る。



[出典] 九州電力データブック2019より引用

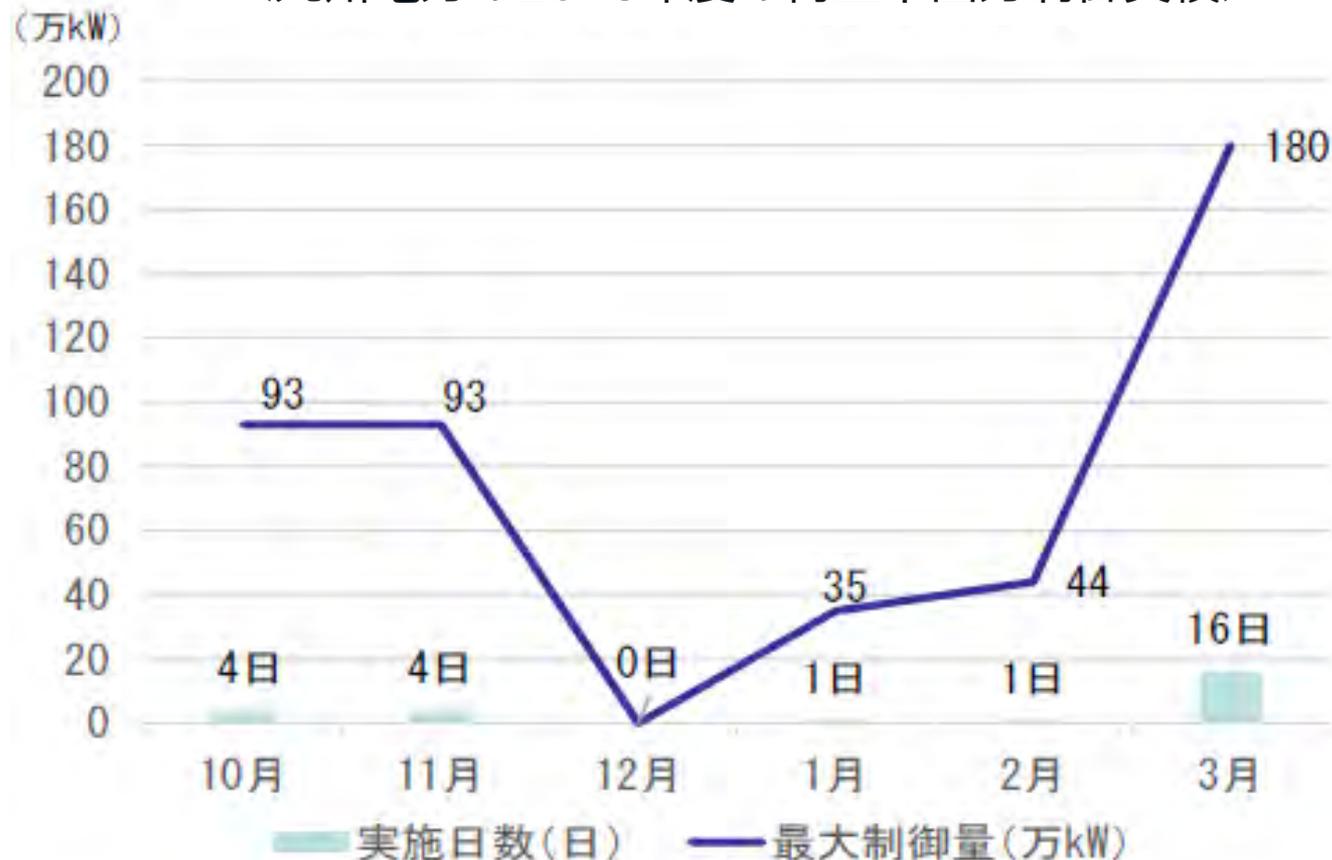
優先給電ルール順

- ①揚水の余剰電力吸収
火力等の制御
- ②関係線活用（他エリアへの送電）
- ③バイオマスの制御
- ④**太陽光や風力の制御**
- ⑤長期固定電源の制御

1-2. 電力需給（その2）

最大180万kWの再エネ抑制があった。（再エネ導入比率の高い九州電力の例）

＜九州電力の2018年度の再エネ出力制御実績＞

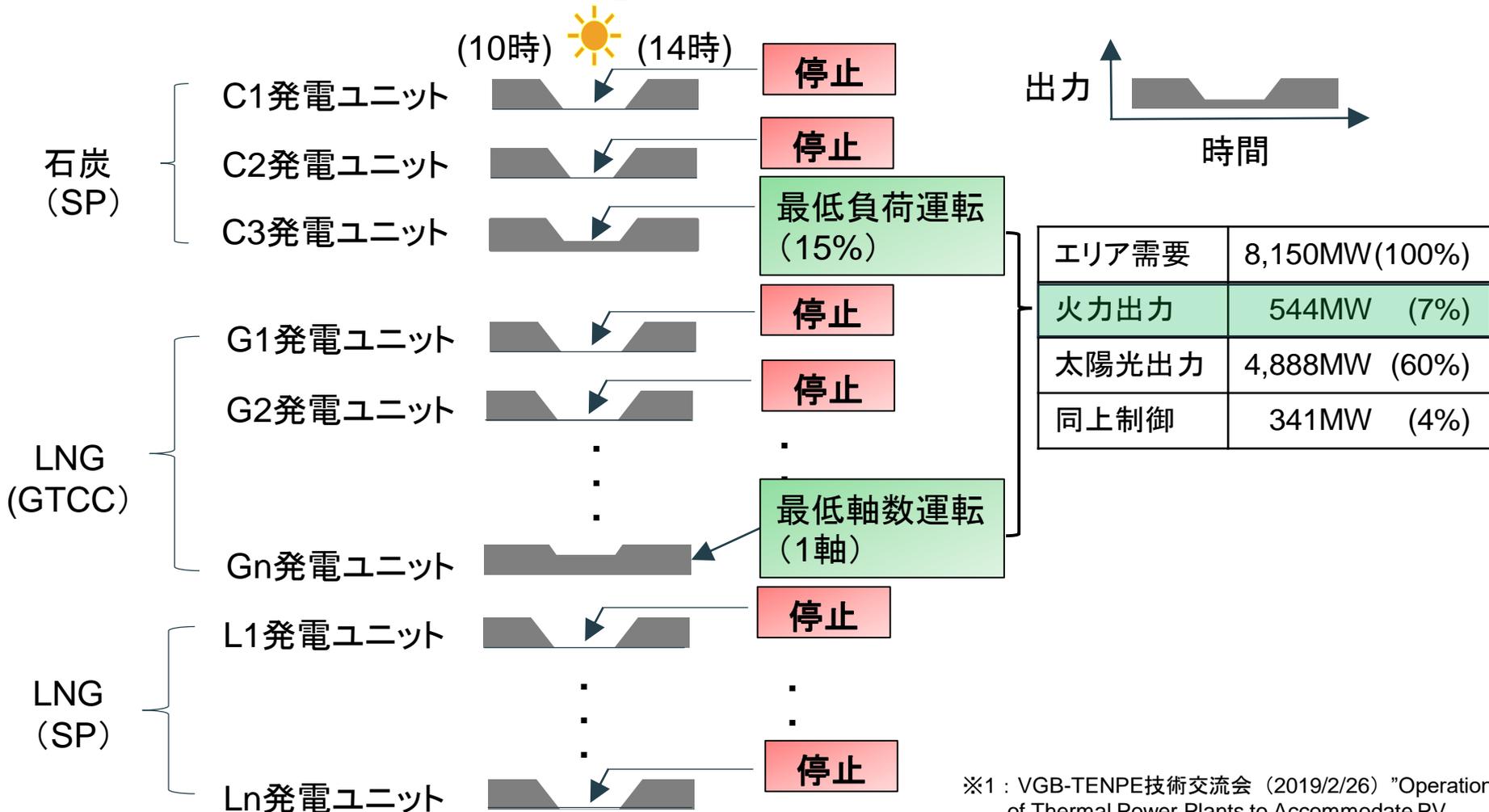


[出典] 九州電力データブック2019より引用

1-3. 再エネ抑制時の火力運用

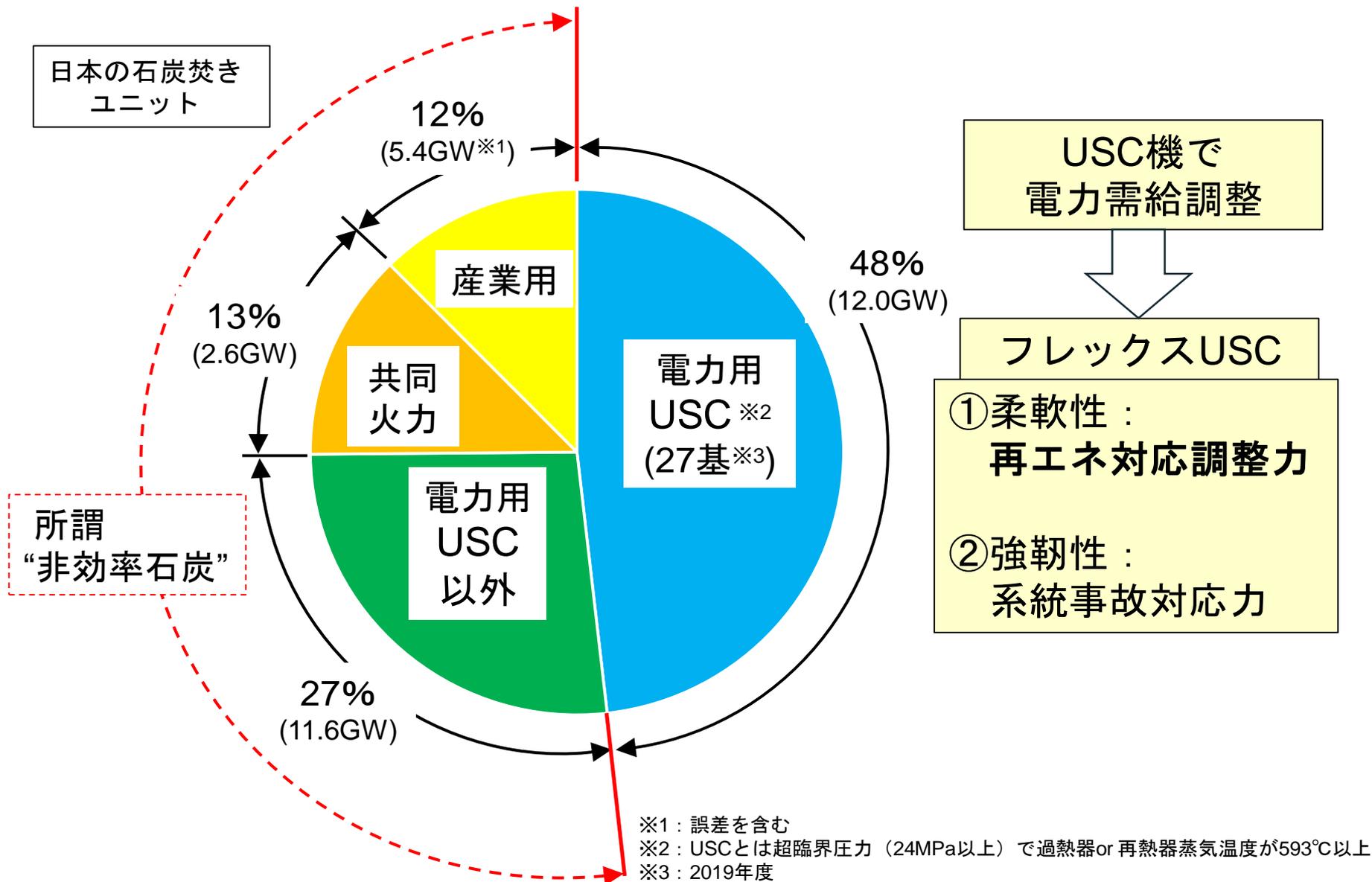
最低負荷 or 停止～高負荷までの運用頻度が増す。

(2019年1月3日の九州電力での運用パターン例 …… 12:00-13:00※1)

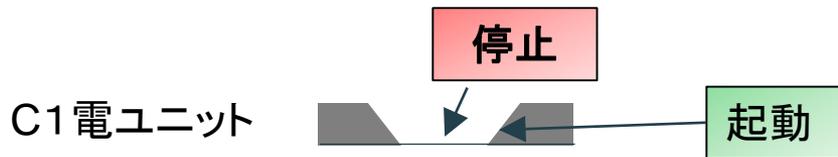


※1 : VGB-TENPE技術交流会 (2019/2/26) "Operation of Thermal Power Plants to Accommodate PV Output in Kyushu" より

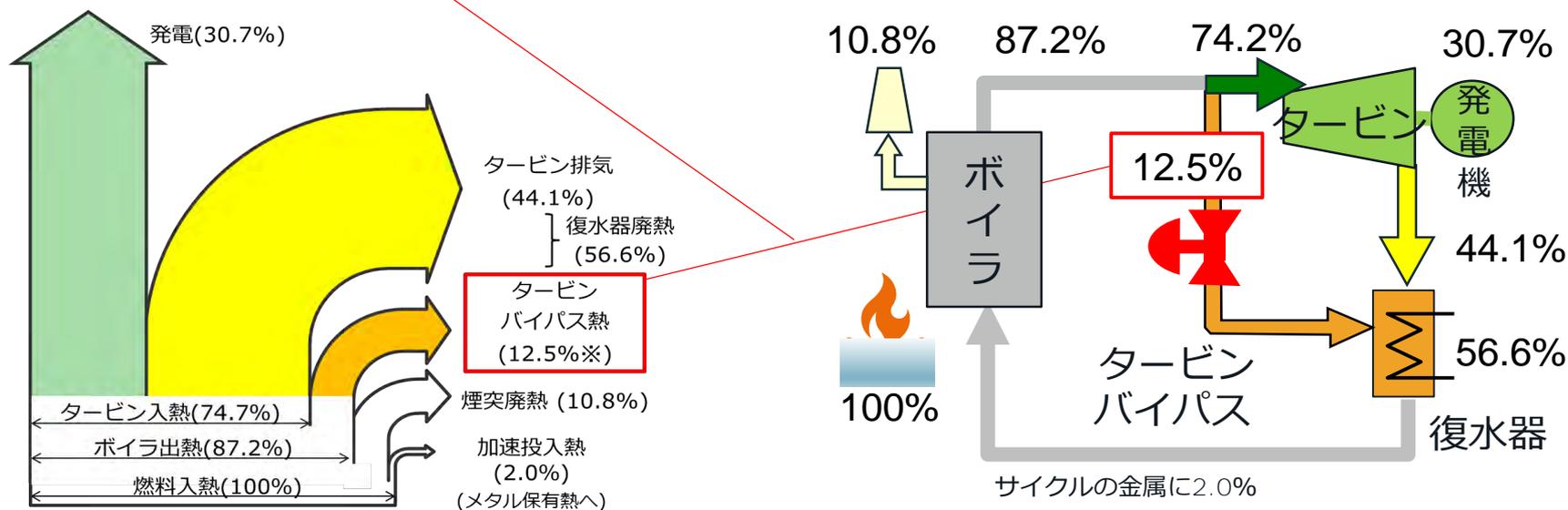
1-4. 非効率石炭停止方針の影響



2-1. 火力機の運用課題と蓄熱による省エネ（その1）



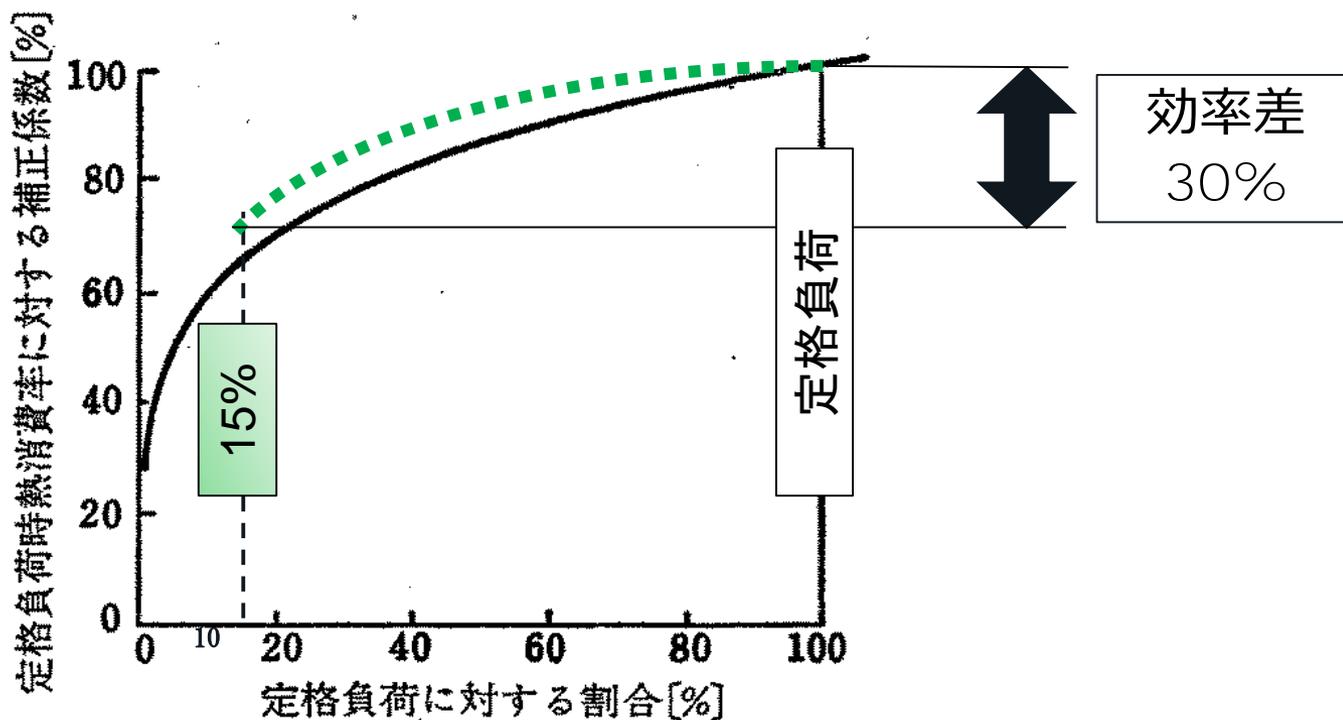
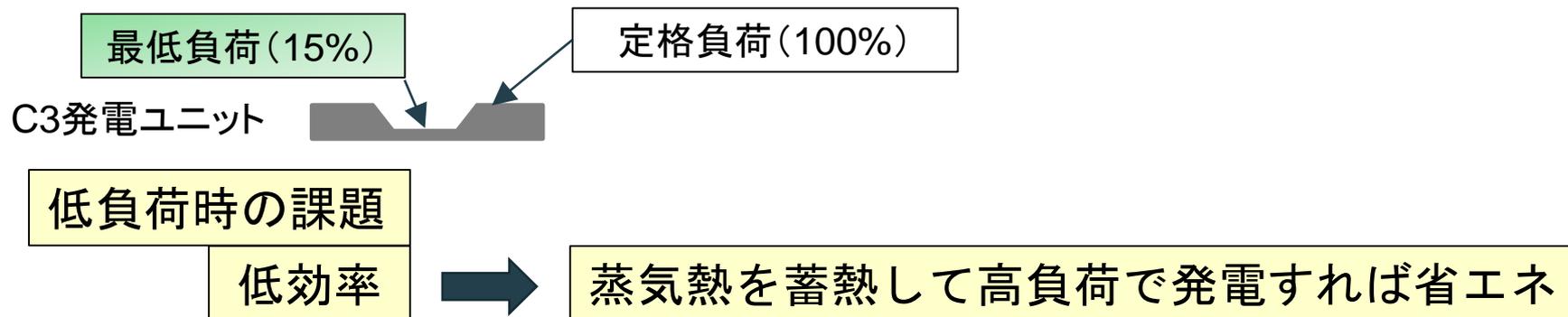
(※1) **暖気廃熱** をタービンバイパスから復水器へ排出（海水へ）



<700MW機の温態状態からの起動過程中(2時間)の熱収支>

[参照]三菱重工技報Vol. 27 No.1 (1990-1)の九州電力松浦1号8時間停止後2h起動での実績より算出

2-1. 火力機の運用課題と蓄熱による省エネ（その2）

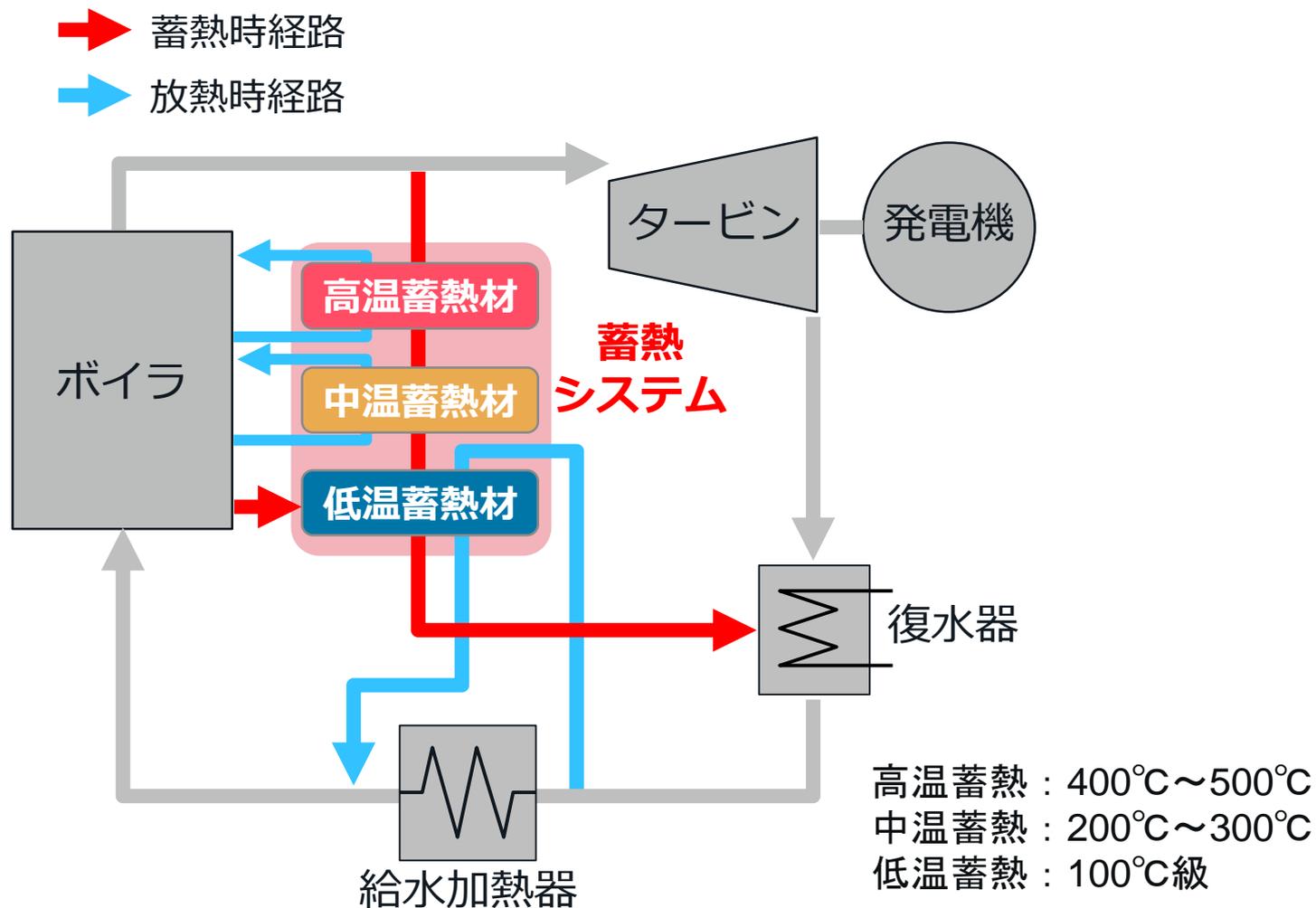


[出典] Robert L. Bartlett, 「蒸気タービン 性能と経済性」 オーム社

緑色線は火原協「再生可能エネルギー時代の火力発電新たな役割と価値」(2014年7月) 図1.7.6 をタービン熱消費率に換算

2-2. 蓄熱システムの概要

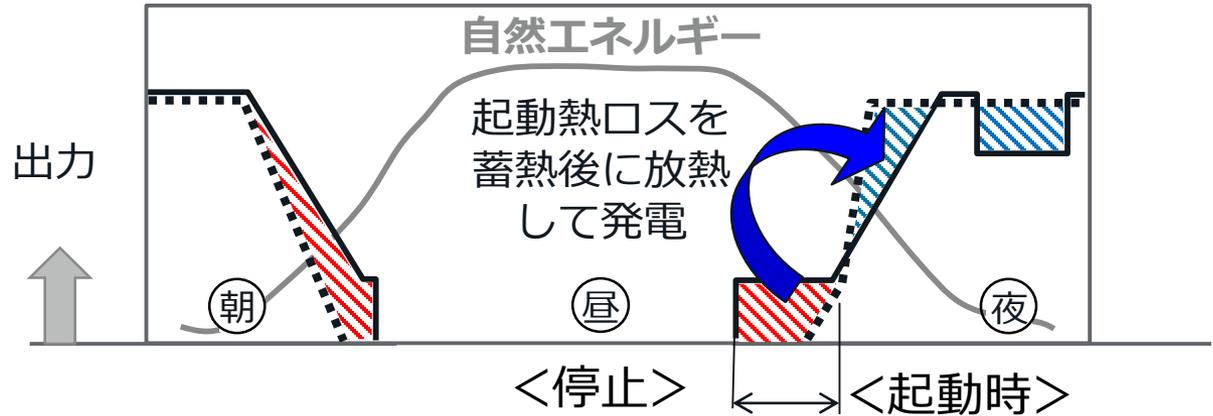
タービンバイパス系統に設置して蓄・放熱



2-3. 蓄熱システム運用例（その1）

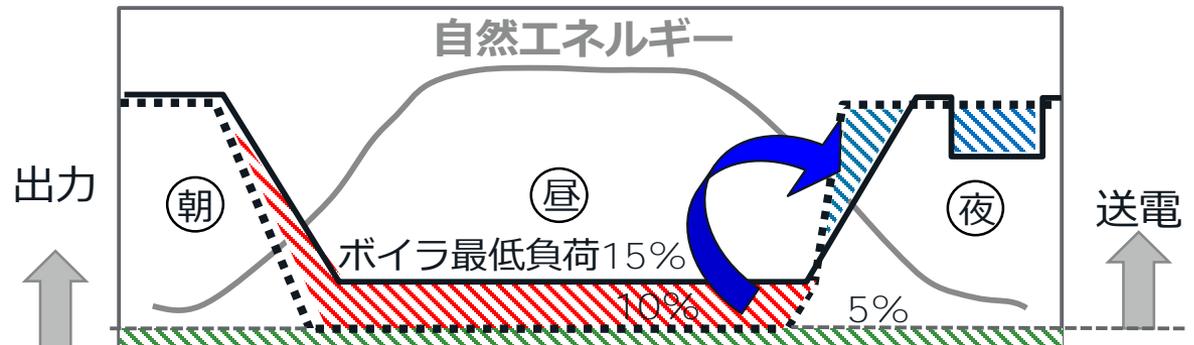
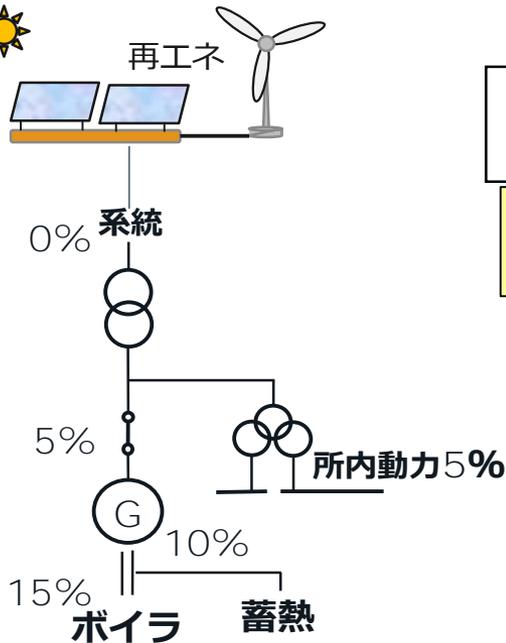
- ボイラ出力
- ⋯ タービン・発電機出力
- 蓄熱
- 放熱
- 所内動力

(1) 起動熱ロス（起動過程入熱12.5%）の蓄熱

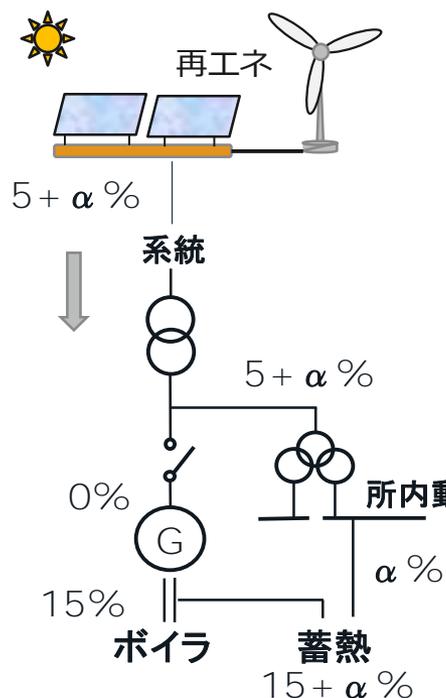


(2) 所内動力（5%）のみ発電して残り10%を蓄熱

狙い：無送電で並列状態 ➡ 慣性力の維持、無効電力の供給（調相）
高調波を出さないことに寄与

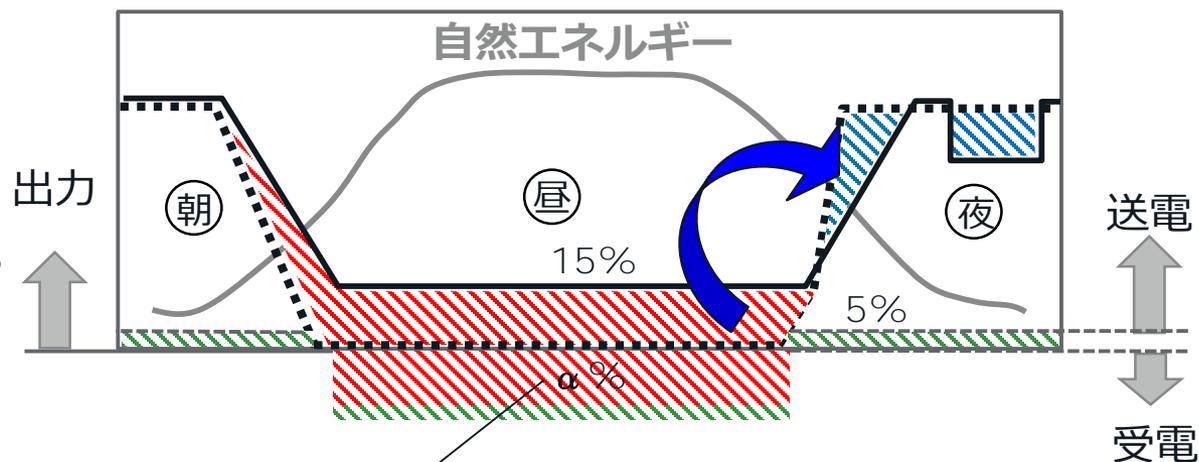
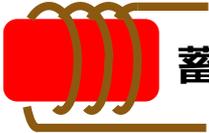


2-3. 蓄熱システム運用例（その2）



(3) 全受電で所内動力 (5%) と蓄熱 (15 + α %)

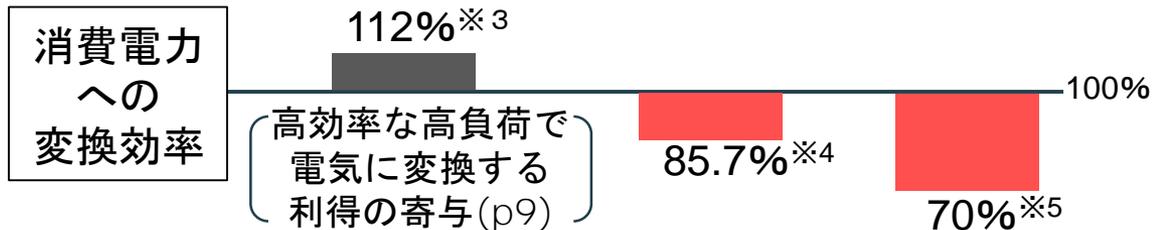
狙い：解列してもボイラは暖気状態 → 並列（発電開始）までの時間短縮に寄与

蓄熱体
電気ヒータで蓄熱

起動時熱ロスと低負荷時の蒸気熱を蓄熱して発電する省エネ効果

蓄熱システムの運用	評価指標	蓄熱	別システム (発電して蓄エネルギーした場合)	
			蓄電	揚水
(1) 起動時熱ロスの蓄熱※1	燃料入熱	1.9%	蓄熱のみが対応可能	
(2) 所内動力のみ発電・蓄熱※2 (無送電・並列状態)		6.2% (3.9%)	2.3% (ベース)	ベース
(3) 全受電で所内動力と蓄熱※2 (解列・ボイラ暖気状態)		10.0%+ α (6.2%+ α)	3.8%+ α (ベース)	ベース



※各方式の数値は、経年劣化や保温からの放熱によるロスは未算入

※1 8時間停止して蓄熱、2時間で50%負荷まで起動後、50%負荷で2時間、20%負荷で約12時間運用する場合（平均負荷率は約15%）

※2 8時間蓄熱後、50%負荷で6時間、20%負荷で約10時間運用する場合（平均負荷率は約20%）

※3 蓄熱有効熱落差90%（高温端から低温端までの熱落差に対する蓄熱エネルギーの割合）

※4 交直変換95%×充放電効率95%×直交変換95% = 85.7%

※5 一般的な揚水発電効率

3-1. 蓄熱材の候補（例）

高・中・低の温度域に応じて適材を選定（物性、価格、等）

潜熱
 潜熱と顕熱
 顕熱

蓄熱体の
大きさに関係

蓄・放熱の
速さに関係

蓄熱材料	融点 ℃	蓄熱利用	密度 ton/m ³	潜熱 kJ/kg	比熱 KJ/KgK	蓄熱量 (潜熱) MJ/m ³	蓄熱量 (顕熱) MJ/m ³ K	熱伝導率 W/mK
高温	Al系※ ¹	約560 ~	約2.5	約500	約1.0	約1250	約2.5	約160
	Zn系※ ¹	約380 ~	約6.6	約140	約0.5	約920	約3.3	約100
中温	NaNO ₃ ※ ²	約310	約2.0	約180	約1.7	約360	約3.4	約0.5
	鈹物油※ ²	-	約0.8	-	約2.6	-	約2.0	約0.1
低温	水※ ²	約200 まで※ ³	約1.0	約2※ ³	約4.2	約2※ ³	約4.2	約0.5
	エリスリ トール※ ¹	約120	約1.5	約340	約1.0	約510	約1.5	約0.7

※1：開発中、一部実用化済み

※2：実用化済み

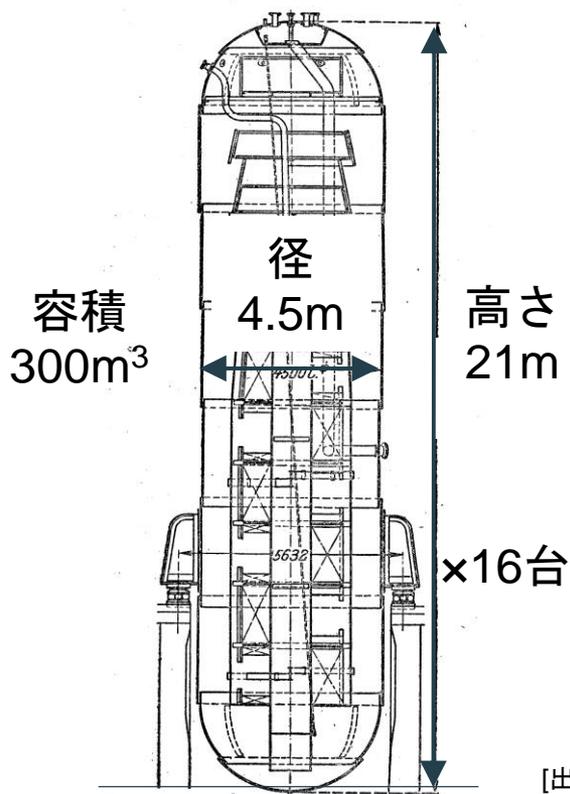
※3：蒸気・水の気液相変化を利用する場合

3-2. 過去の水蓄熱の実績

1920年代のドイツでピーク電力対応向けに用いられていた。

〔 潜熱利用の降圧Ruths蓄勢器
(出力4~5MWh) 〕

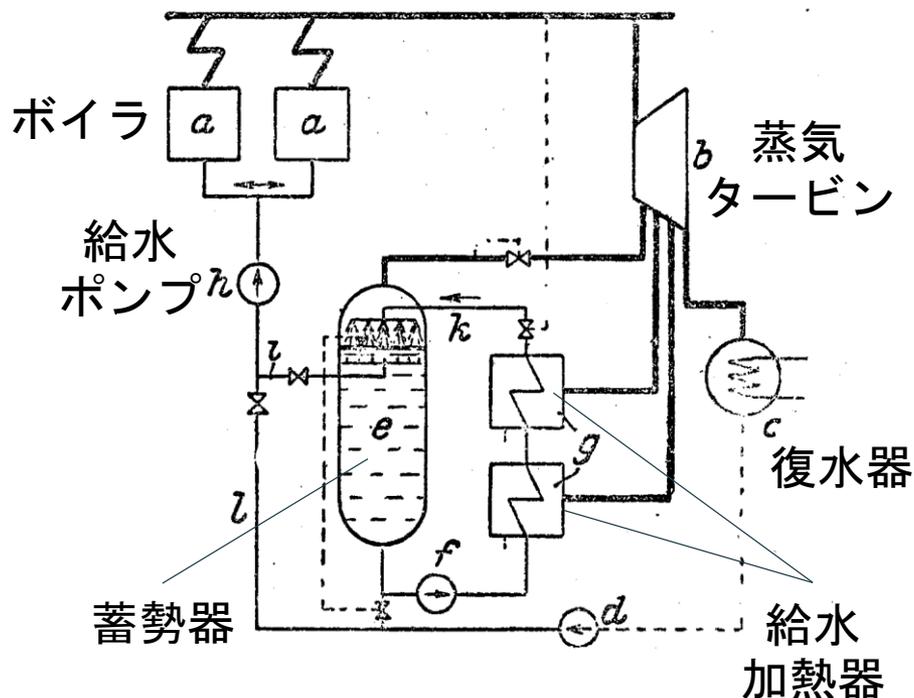
Charlottenburg発電所では16台設置
して20MW蒸気タービンを駆動。



〔 顕熱利用の等圧蓄勢器 〕

蓄熱：低負荷時に給水加熱器gを循環して蓄勢器eを高温水で充填。

放熱：蓄勢器eの底部に復水が流入し給水ポンプhから高温水を供給。



[出典] ミュンチンゲル、蒸気原動力(水管式蒸気缶と蒸気原動所) 高瀬謙一訳 コロナ社 昭和13年

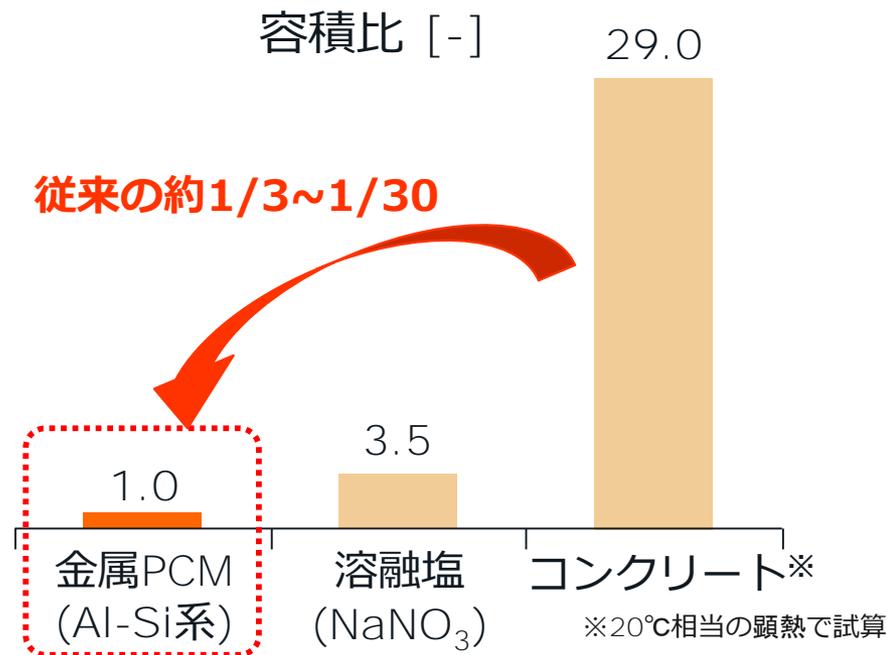
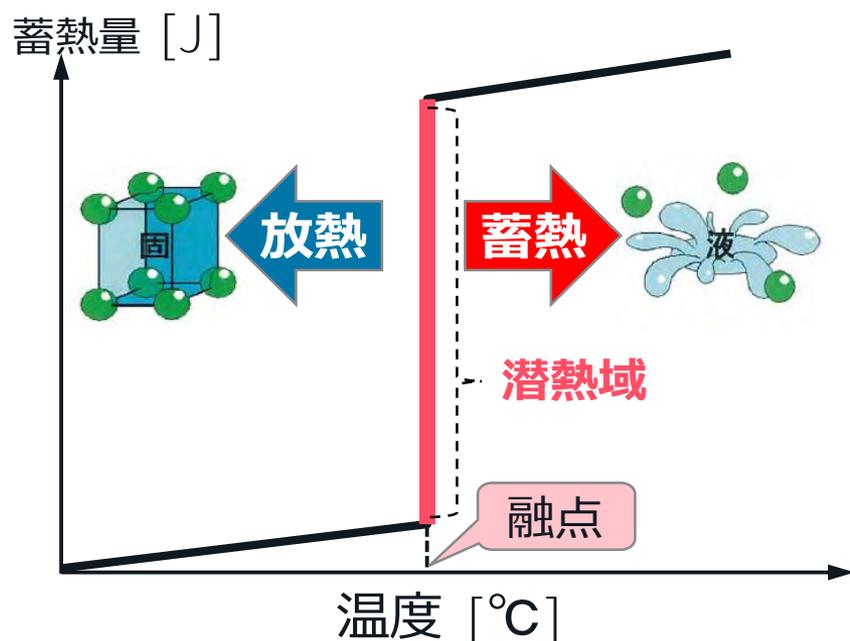
3-3. PCMによる高温蓄熱材の検討

PCM(Phase Change Material):相変化による潜熱利用材

金属PCMによるコンパクト化・迅速な蓄・放熱が可能

(a) PCMの作動原理

(b) 等蓄熱量での容積比較

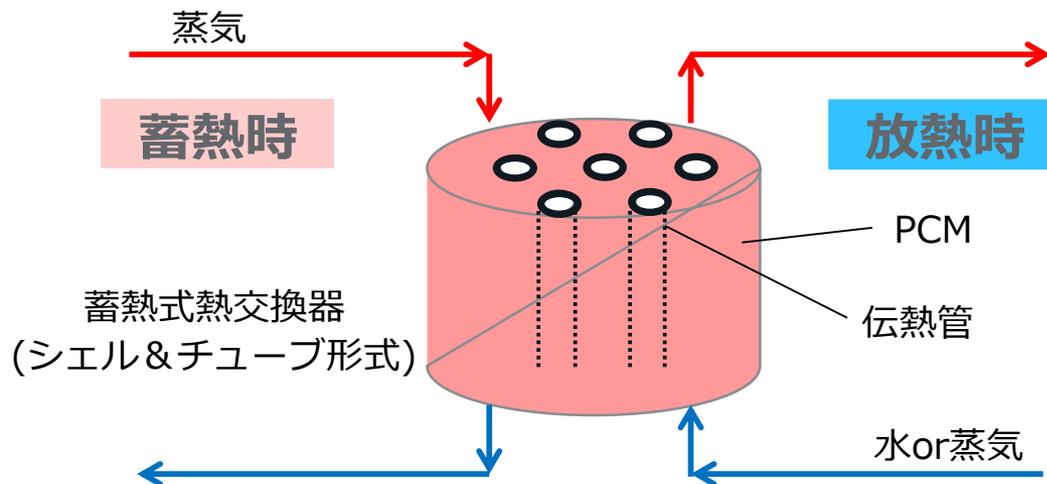


金属PCMのメリットと課題

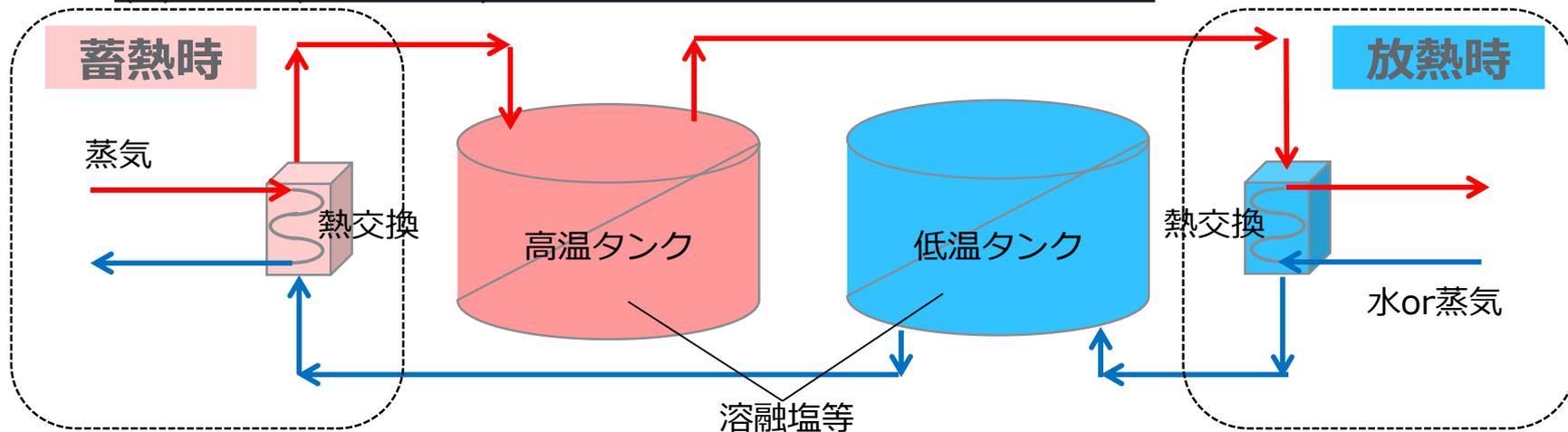
- 大きな熱容量 (従来比5~30倍)
- 良好な熱伝導性 (従来比200~300倍)
- 腐食性への対応

- ⇒蓄熱体のコンパクト化
- ⇒迅速な蓄・放熱
- ⇒防食対策は必要

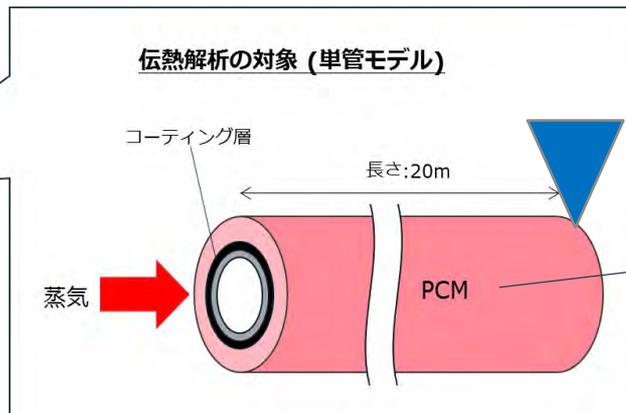
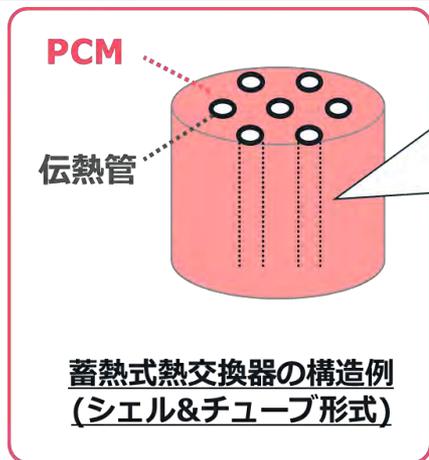
(a) PCM(金属等)の潜熱を利用した蓄熱システム例



(b) 液体(溶融塩等)の顕熱を利用した蓄熱システム例



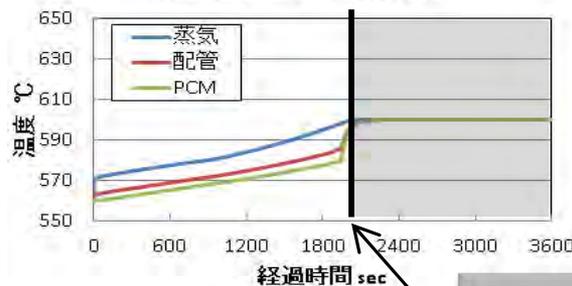
3-5. 蓄熱高温熱交換器の伝熱解析例



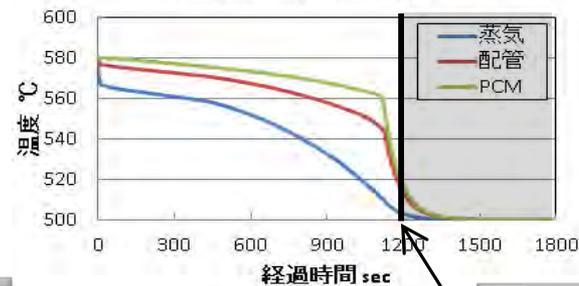
出口部での温度挙動を確認

(a)蓄熱時(600°C蒸気により加熱) (b)放熱時(500°C蒸気により吸熱)

出口(x=20m)の温度分布



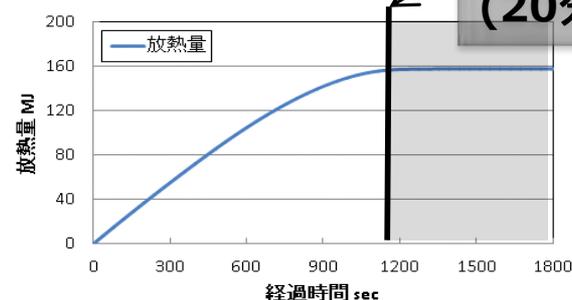
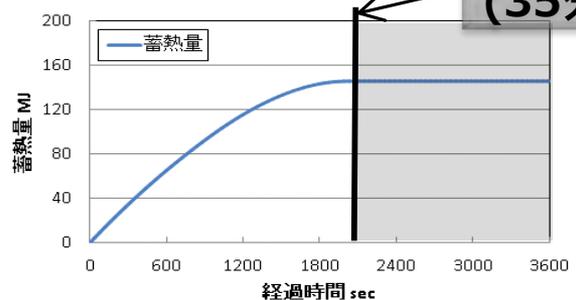
出口(x=20m)の温度分布



分単位での熱の
出し入れが可能

蓄熱完了
(35分後)

放熱完了
(20分後)



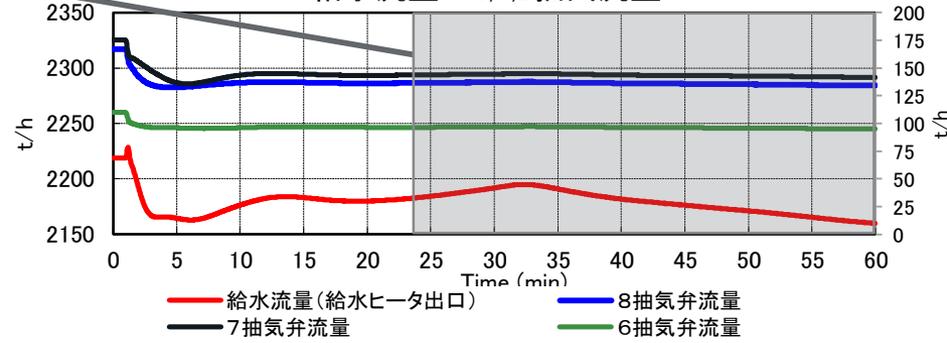
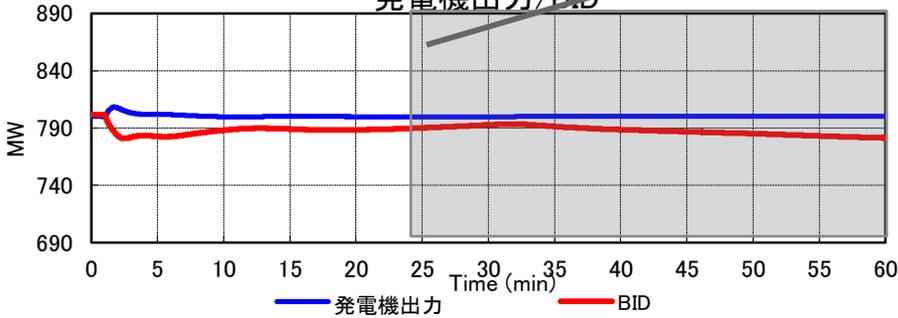
3-6. 放熱時の過渡応答シミュレーション例

特に問題となる挙動はないことを確認

放熱完了

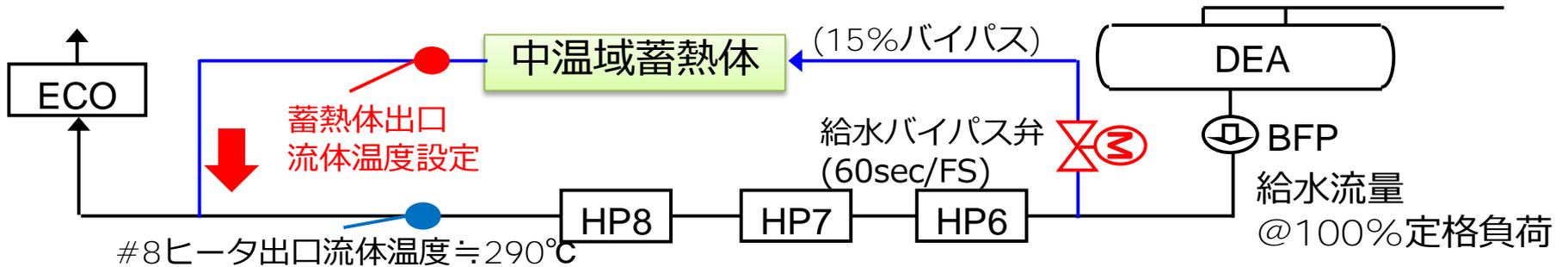
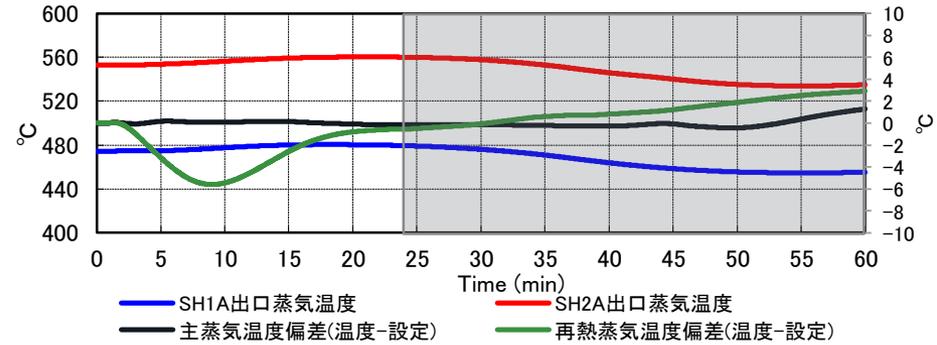
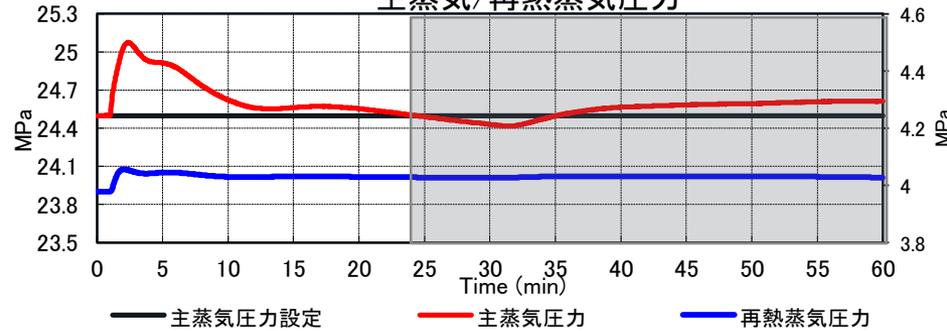
発電機出力/BID

給水流量/#6,7,8抽気流量

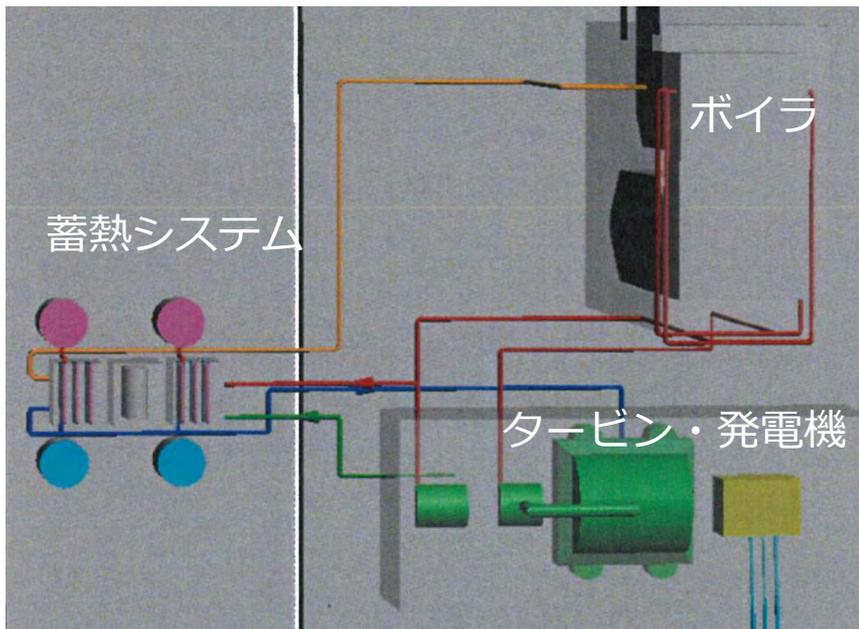


主蒸気/再熱蒸気圧力

SH出口温度/主蒸気・再熱蒸気温度偏差

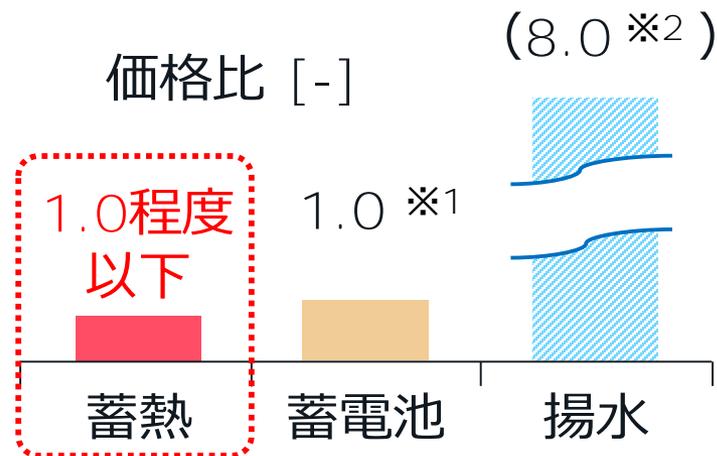


蓄熱システム配置イメージ



700MW級プラントで定格の10%相当の熱量を2時間蓄熱する装置を熔融塩と同等の熱容量の蓄熱材で構成する際のイメージ図
(やや斜め上からの鳥観)

各システムの価格比較 (蓄エネルギー当り)



※1: 例として ;

① 70,000円/kWh@2016

2016年に南オーストラリア州にテスラ社が納入した100MWhの蓄電システムの販売価格

② 41,000円/kWh@2018

DOEのNREL (The National Renewable Energy Laboratory) 報告書"2018 U.S. Utility-Scale Photovoltaics Plus-Energy Storage System Costs Benchmark"での240MWh(60MW×4h)の価格

③ 52,000円 /kWh(平均)@2018

40,000円 /kWh(平均)@2025

DOEレポート (PNNL-28866 by Pacific Northwest National Laboratory他) 2019年報告書

※2: 揚水は建設費をある仮定の下で試算した超概算



ご清聴ありがとうございました。