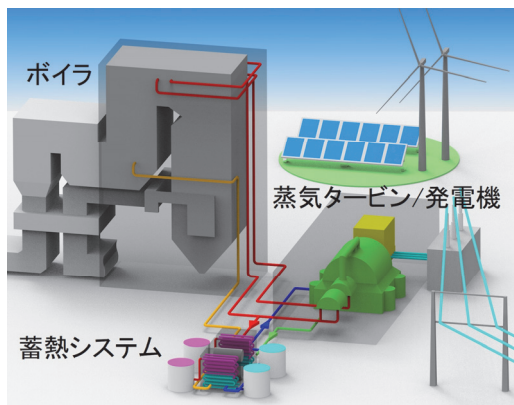


再生可能エネルギー時代の 高効率電力レジリエンス蓄熱システム

High Efficiency Thermal Storage System for Power Resilience
in the Era of Renewable Energy



山本 健次郎^{*1}
Kenjiro Yamamoto

堂本 和宏^{*2}
Kazuhiro Domoto

当房 誠^{*3}
Makoto Tobo

川水 努^{*4}
Tsutomu Kawamizu

山名 崇裕^{*5}
Takahiro Yamana

太田 裕二^{*6}
Yuji Ota

再生可能エネルギー伸長に呼応した電力レジリエンス機能(調整力・予備力)の向上策として、蓄熱システムを火力発電所のタービンバイパス系統他に組み込んで、停止・起動時や極低負荷運転時のボイラ余剰熱(廃熱)を蓄熱して高負荷運転時の発電に利用すれば、約2%以上の省エネルギー効果が得られる。PCM(Phase Change Material: 固液間の融解・凝固の相変化を利用)の大きな潜熱の活用、あるいは熔融塩や水といった顕熱蓄熱材の蓄熱時の温度差を大きくすることで蓄熱装置のコンパクト化を図ることができ、発電所構内への設置が可能となる。本システムを蓄電システムと同等な価格で実現すべく開発・実用化を推進中である。

1. はじめに

資源エネルギー庁の総合エネルギー統計等によれば、我が国の2030年度総発電電力量の構成比率は再生可能エネルギー22~24%、石炭 26%、LNG27%、石油3%、原子力 20~22%へ推移する。再生可能エネルギーは2017年度の17%から伸長して主電源の一つとなるが、本エネルギーの大部分を占める太陽光発電(PV: Photovoltaics)や風力発電は日照や風況といった自然環境によって電力送電網への給電量が大きく変動する。この際の電力需給バランス調整には、火力発電所の給電量増減及び揚水発電所での揚水・放水が主要な役割を果たしており、これは再生可能エネルギー導入先進地域の欧州でも同様である⁽¹⁾。図1は再生可能エネルギー導入比率の最も高い九州電力(株)での調整の状況を示した例である⁽²⁾。同電力では石炭火力1基を最低出力で運用するとともに GTCC(LNG)は最低軸数運転を行い全火力発電所の調整能力をフルに発揮しても、PVの発電量が管内需要の60%まで達した時にはPVの出力制限をするに至ったことがあった⁽³⁾。

今後も再生可能エネルギーの給電量が増えれば、火力発電所は昼間の出力を抑制するために、①停止回数を増やす、②最低出力を現状より下げて運用することが求められ、また、日照や風況の突然の変化に対応するため、③出力の変化率を向上させることも望まれる。

このような状況の中、2018年の再生可能エネルギーの主電力化を織り込んだ第5次エネルギー基本計画を受けて、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では“熱エネルギー貯蔵(蓄熱)”を重要技術の一つと位置付けて社会実装を促進している。

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部ボイラ総括技術部ボイラ戦略部 技監 技術士

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部ボイラ総括技術部ボイラ戦略部 次長

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部プロジェクト総括部長崎プラント技術部 主席技師

*4 総合研究所 伝熱研究部 主席研究員 工博

*5 総合研究所 伝熱研究部

*6 ICTソリューション本部 CIS部 主席技師

本報ではPCMの潜熱の熱容量が大きいことを活用、あるいは溶融塩や水といった顕熱蓄熱材の蓄熱時の温度差を大きくすることでコンパクトな蓄熱装置を開発し、発電所に実装することで高効率な電力レジリエンス機能が実現可能であることを示す。また、金属PCMを蓄熱体に適用することで、蓄熱・放熱を迅速に行い出力変化への即応性の向上も狙った開発・実用化も推進中であることを紹介する。

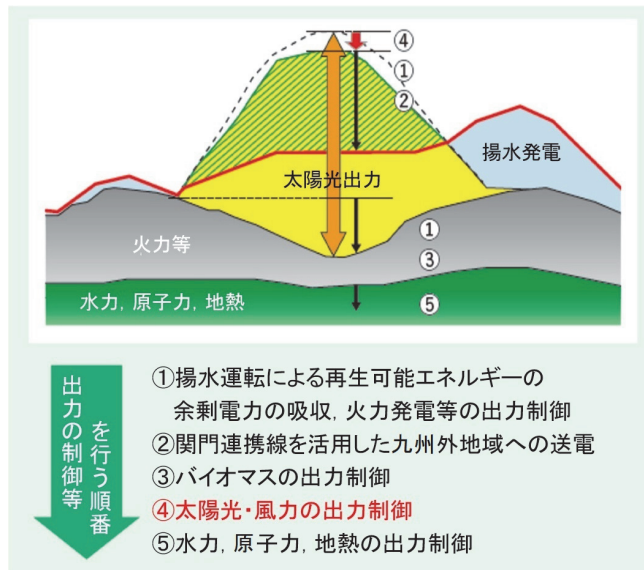


図1 再生可能エネルギー伸長に伴う電力需給バランス
(九州電力(株)の例⁽²⁾)

2. 蓄熱システムによる調整力・予備力の向上

2.1 蓄熱システムの系統構成

火力発電所は、送電端出力（給電量）に所内動力（定格発電機容量の5%程度）を加えた発電端出力に対応した熱量をボイラから供給することで通常の運用を行っている。停止・起動する、或いは、ボイラ最低出力よりも低いタービン・発電機出力で運用する頻度を増やすことで、再生可能エネルギー供給量と電力需要を調整する際には、停止・起動操作時の熱損失やボイラ最低負荷とタービン・発電機出力のミスマッチ分が、タービンバイパス系統他から廃熱として復水器に捨てられる。これは石炭火力では微粉炭機による石炭粉碎と火炉での燃焼を安定させるためにボイラ出力を15%程度以上に保つ必要があるためである。

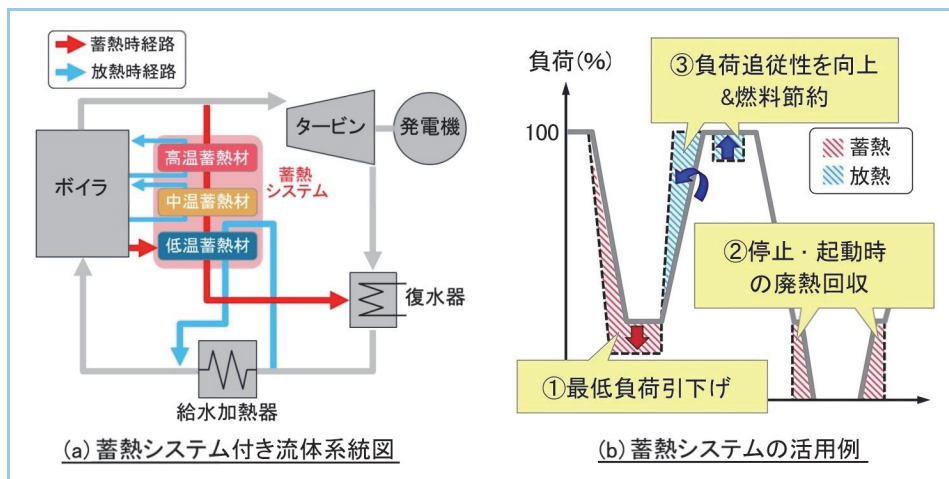


図2 蓄熱システム付き流体系統図と活用法の概念図

蓄熱システムを火力発電所のタービンバイパス系統他に組み込んだ系統と活用法の概念を図2に示す。廃熱を無駄なく利用するためには蒸気の潜熱及び低温域の顕熱まで蓄熱することが重要

であり、図3(a)のh-s線図に示すように、タービンサイクルで発電する際とほぼ同量の熱落差を蓄熱することが可能な装置を用いることが必要になる。なお、蓄えた熱をタービン効率の高い高負荷運転時に利用することにより、低負荷で発電するよりも大幅な省エネルギー効果が得られる。(図3(b))

本システムは、図2(a)に示すように蓄熱温度の異なる蓄熱材を利用した蓄熱装置と配管、バルブ、制御装置から構成される。蓄熱時にはタービンバイパス系統、気水分離器ドレン系統からの蒸気・水の熱量を蓄熱して復水器へ排出する。放熱時は温度域を分割して被加熱流体(蒸気・水)を加熱することにより、蒸気サイクルへの影響を最小限にした。(特許出願済み)

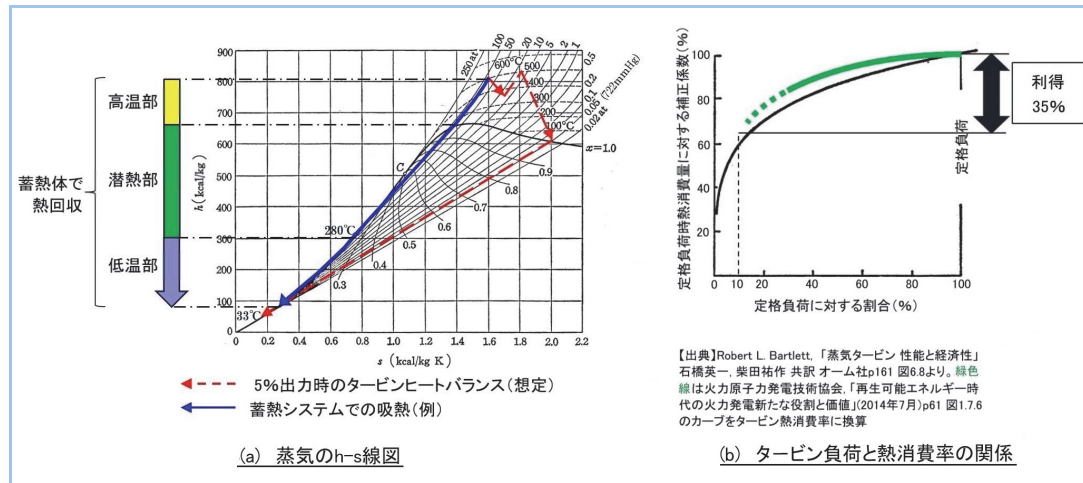


図3 蒸気のh-s線図及びタービン負荷と熱消費率の関係

2.2 蓄熱システムの運用

上記のシステムを使った5種類の運用パターンを図4で紹介する。

図4(a)は、再生可能エネルギーの給電量が多い日中に発電所を停止して、夕刻に起動後、夜間と朝の需要に対応する例である。ボイラ出力とタービン・発電機出力のミスマッチ分である赤のトーンに相当する熱量が、起動時のタービンバイパス系統(TB 弁)、気水分離器ドレン系統(WDC 弁から復水器に廃熱として捨てられる。図5は700MW機のDSS(Daily Stop and Start)運用時の120分起動での熱勘定図であり、廃熱は燃料入熱の12.5%に相当している。この廃熱を蓄熱して、青のトーンのように放熱して発電する運用パターンである。このようにタービンを經由することなく捨てられていた廃熱をそのまま貯蔵して発電に使うことは蓄電システムや揚水発電では対応できず、蓄熱システムにしかできないことである。

図4(b)は、ボイラを最低出力の15%まで下げて、タービン・発電機出力を10%とし所内動力5%を差し引いた5%を送電、ミスマッチ分5%相当の廃熱をタービンバイパス系統で蓄熱するパターンである。放熱は(a)と同様である。

図4(c)は、ボイラは最低出力の15%、タービン・発電機出力を5%まで下げて所内動力5%を賄って系統無送電運転とし(発電機遮断器は閉)、ミスマッチ分の10%相当の廃熱をタービンバイパス系統で蓄熱するパターンである。送電量が0%に低下するため再生可能エネルギーの給電量を増やすことができる。

図4(d)は、ボイラは最低出力の15%、その熱を蓄熱して、所内動力5%は受電することで賄い、タービン・発電機は停止状態(ボイラ単独運転)で運転するパターンである(発電機遮断器は開)。ボイラは暖気されているため、タービン・発電機の並列・出力の上昇は発電所を停止するより速く行える。発電所が受電することで再生可能エネルギー給電量は更に増加させることができる。

図4(e)は、(d)に加えて電気ヒータで蓄熱体を加熱する電力を受電するもので、その分更に再生可能エネルギー給電量を増やすことができる。

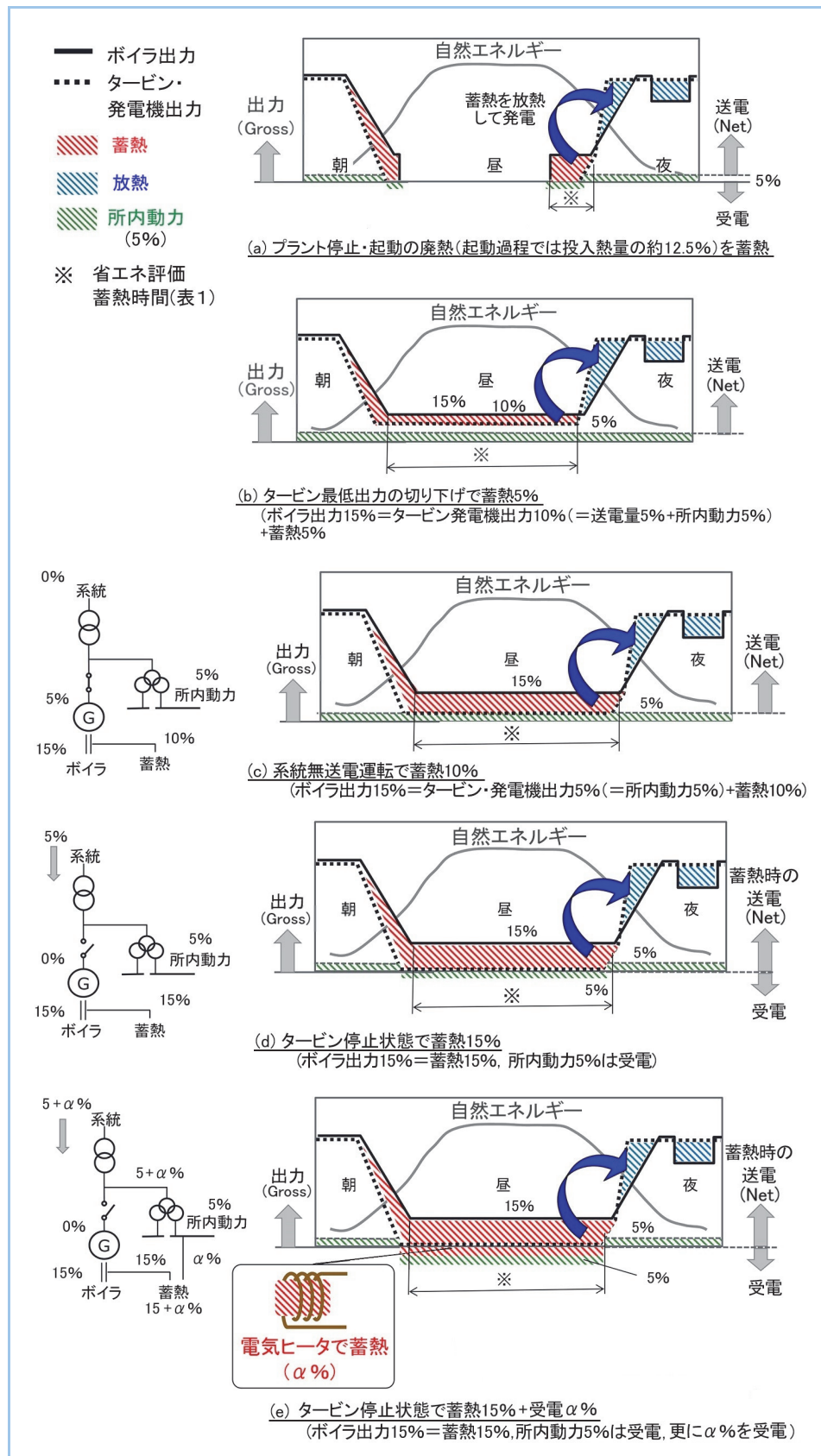


図4 蓄熱システムを利用した火力発電所の運用パターン

2.3 省エネルギー効果の試算と経済性

上述の5種類の運用パターンでの省エネルギー効果を纏めると表1のようになる。図4(a)～(e)のように火力発電所を日中8時間停止、あるいは蓄熱して給電量を調整する場合と、蓄電システム及び揚水発電所で給電量を調整する場合とを比較すると、蓄熱は他の方式に比べて2%～6%の省エネルギー効果の向上がもたらされる。これは先に図3(b)で説明したように蓄えた熱をタービン効率の高い高負荷帯で利用することが可能になるためである。エネルギー利用の観点から

消費電力量への変換効率は、蓄熱:蓄電:揚水=90%:85%:70%と目される。(蓄放熱効率, 蓄放電効率, 揚水効率の概略比) また, 再生エネルギーの伸長に伴い, 火力発電所はタービン効率の低い低負荷帯での運用が多くなるため, 省エネルギー法のベンチマーク制度で設定されている火力発電効率目標値との乖離を補う有効な手段に蓄熱システムがなり得る。さらに, 廃熱として復水器から海に捨てられるエネルギーを発電に利用するという観点から, ベンチマーク指標の計算式では廃熱の分だけ指標が向上する。

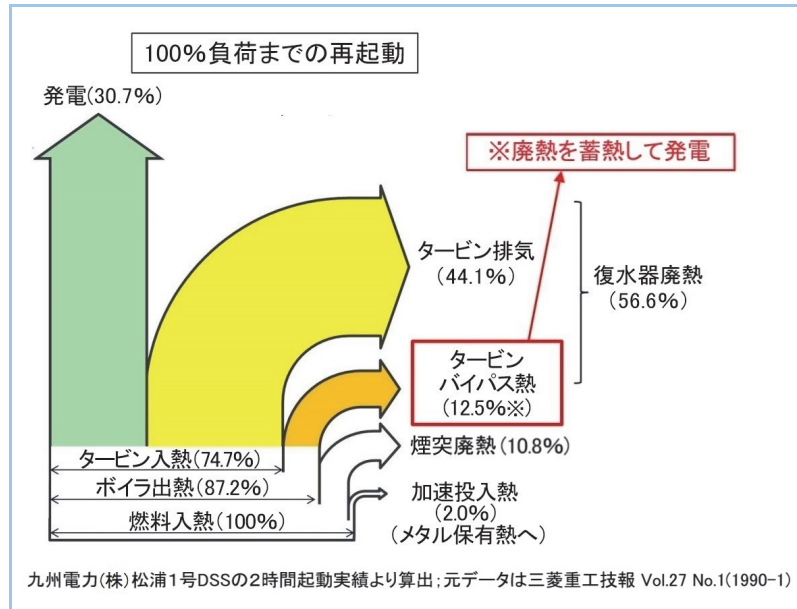


図5 700MW 機の DSS 2 時間起動時の熱勘定図

表1 省エネルギー効果の試算

蓄熱のパターン	評価指標	蓄熱	蓄熱せずに送電して貯える場合	
			蓄電※3	揚水※4
図4(a) プラント停止・起動の廃熱(起動過程熱量の約12.5%)を蓄熱※1	燃料入熱	1.9%	蓄熱のみが対応可能	
図4(b) タービン最低出力切り下げで蓄熱5%※2		2.90% (1.8%)	1.1% (ベース)	ベース
図4(c) 系統無送電運転で蓄熱10%※2		6.20% (3.9%)	2.3% (ベース)	ベース
図4(d) タービン停止状態で蓄熱15%※2		10.00% (6.2%)	3.8% (ベース)	ベース
図4(e) タービン停止状態で蓄熱15+ α %※2		10.0%+ α (6.2%+ α)	3.8%+ α (ベース)	ベース

※(全体) 上表の各方式の数値は, 経年劣化による蓄エネルギー減少は未考慮

※1 DSS(昼に8時間停止)で2時間で起動後, 50%負荷で2時間, 20%負荷で約12時間運用すると仮定(1日の平均負荷率は約15%)

※2 それぞれ8時間で蓄熱後, 50%負荷で6時間, 20%負荷で約10時間運用すると仮定(1日の平均負荷率は約20%)

※3 蓄電池のエネルギー変換効率は85.7% (交直変換95%×充放電95%×直交変換95%と仮定)を考慮

※4 一般的な揚水発電効率70%を考慮した

3. 蓄熱装置の開発

3.1 蓄熱材料

発電分野に実装された蓄熱材料としては, 1916年に欧州で負荷変動に対応するために用いられた Ruths 蓄熱器他⁽⁴⁾で水が用いられた例から始まり, 種々の検討が従来から行われており, PCM を利用する開発も行われている^{(5)~(9)}。2.1節で説明したように放熱先の温度域を分散するために, それぞれの温度域を融点とする何種類かの PCM あるいは液体, 固体の顕熱蓄熱材で

蓄熱装置を多段に構成することが、放熱時の水・蒸気サイクルへの影響を最小限にする観点から望ましい。図6(a)はPCMの蓄熱と放熱の原理を模式的に解説したもので、金属PCMを用いれば熱容量と熱伝導率が高い利点を生かして、コンパクトで迅速な熱の出し入れができる。また、熔融塩・油・水等の液体を顕熱蓄熱材として用いて蓄熱時の温度差を大きくとることでコンパクト化を図ることができる。これら液体の顕熱蓄熱材では熱交換器内での流速を速くすることで熱の出し入れを迅速に行うことができる。図6(b)は金属PCM、熔融塩、コンクリート(顕熱蓄熱)のサイズ比を示したもので、熱容量の逆数比に相当したコンパクト化が図れる。図7(a)にはPCMを利用した蓄熱システム例、図7(b)には液体の顕熱蓄熱材を利用した蓄熱システム例を示す。表2に各温度域で想定される蓄熱材料の候補材の一例を示す。なお蓄熱材料によっては腐食性が高いためシステム構成機器の防食が課題となる。

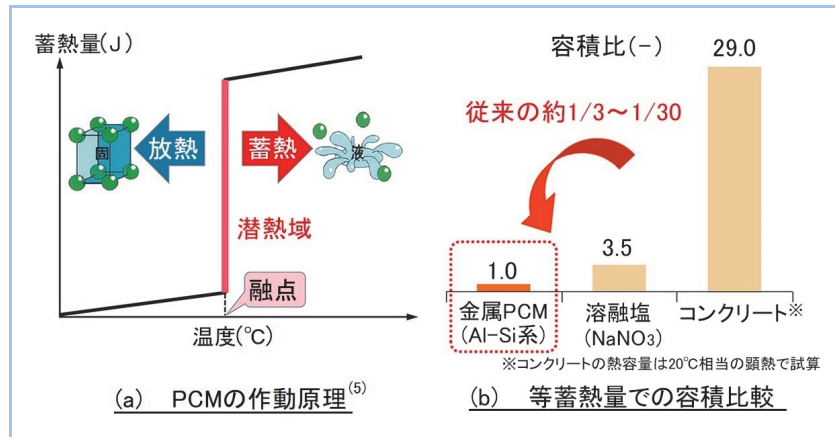


図6 PCMの作動原理と等蓄熱量での容積比較

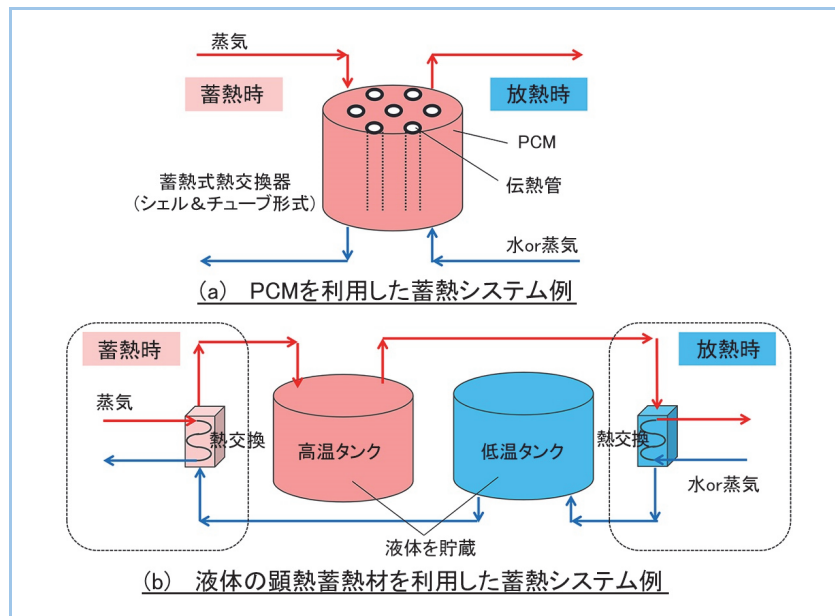


図7 蓄熱システム例

表2 蓄熱材料の例と物性、熱的指数 (概略値)

蓄熱材料	融点 ℃	密度 kg/m ³	潜熱 kJ/kg	蓄熱量(潜熱) MJ/m ³	比熱 KJ/KgK	蓄熱量(顕熱) MJ/m ³ K	熱伝導率 W/mK	蓄熱方式 の例
高温								
Al系	約560~	約2500	約500	約1300	約1.0	約2.5	約160	潜熱
Zn系	約380~	約6600	約140	約920	約0.5	約3.3	約100	潜熱
中温								
NaNO ₃	約310	約2000	約180	約360	約1.7	約3.4	約0.5	顕熱/潜熱
鉱物油	—	約770	—	—	約2.6	約2.0	約0.1	顕熱
低温								
水	—	約1000	—	—	約4.2	約4.2	約0.5	顕熱
エリスリトール	約120	約1500	約340	約510	約1.0	約1.5	約0.7	潜熱

3.2 熱交換器と伝熱解析

図7(a)の PCM を装填した熱交換器を用いたシステムで伝熱解析を行った際のモデルを図8に示す。潜熱域 $560^{\circ}\text{C} \sim 580^{\circ}\text{C}$ の Al 系 PCM を用いた蓄熱式熱交換器(伝熱管長さ 20m を仮定)を対象に、管出口での蒸気温度と蓄熱・放熱量の経時変化を予測した。解析結果の一例を図9に示す。 600°C の蒸気で蓄熱する場合(図9(a))、初期には上流側から順次蓄熱が始まり管出口の蒸気温度は約 570°C となる。上流側の PCM の温度が上昇していくにつれて管出口の蒸気温度も上昇して行き、約 2100 秒(35 分)後には管出口の蒸気温度及び PCM 温度も管入口での蒸気温度とほぼ同じ温度となり蓄熱が完了する。(蓄熱完了時には出口部の PCM 温度も潜熱域 $560 \sim 580^{\circ}\text{C}$ 以上の温度になっている) 500°C の蒸気に放熱する場合(図9(b))、初期の管出口の蒸気温度は約 565°C となるが、放熱により蓄熱体の温度が降下していくにつれて管出口の蒸気温度も降下していき、約 1200 秒(20 分)後には PCM 温度が蒸気温度とほぼ同じになり放熱が完了する。この結果から、金属 PCM を活用すれば分単位での迅速な蓄熱・放熱が可能であり、金属 PCM は溶融塩などのシステムと同等以上の蓄熱・放熱速度を有することを確認した。

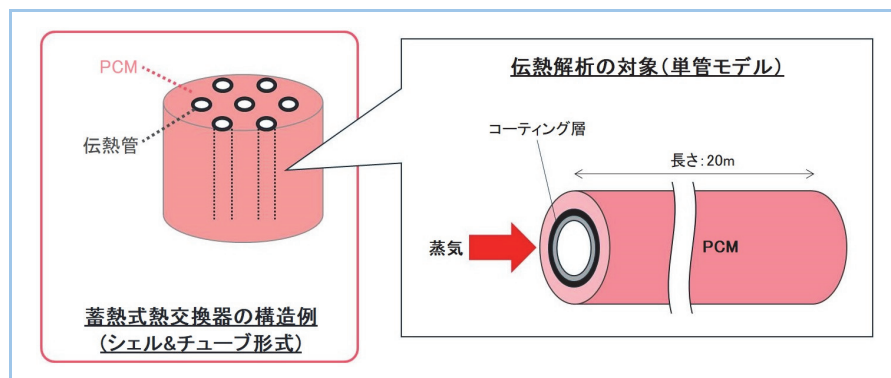


図8 蓄熱式熱交換器と伝熱解析モデル

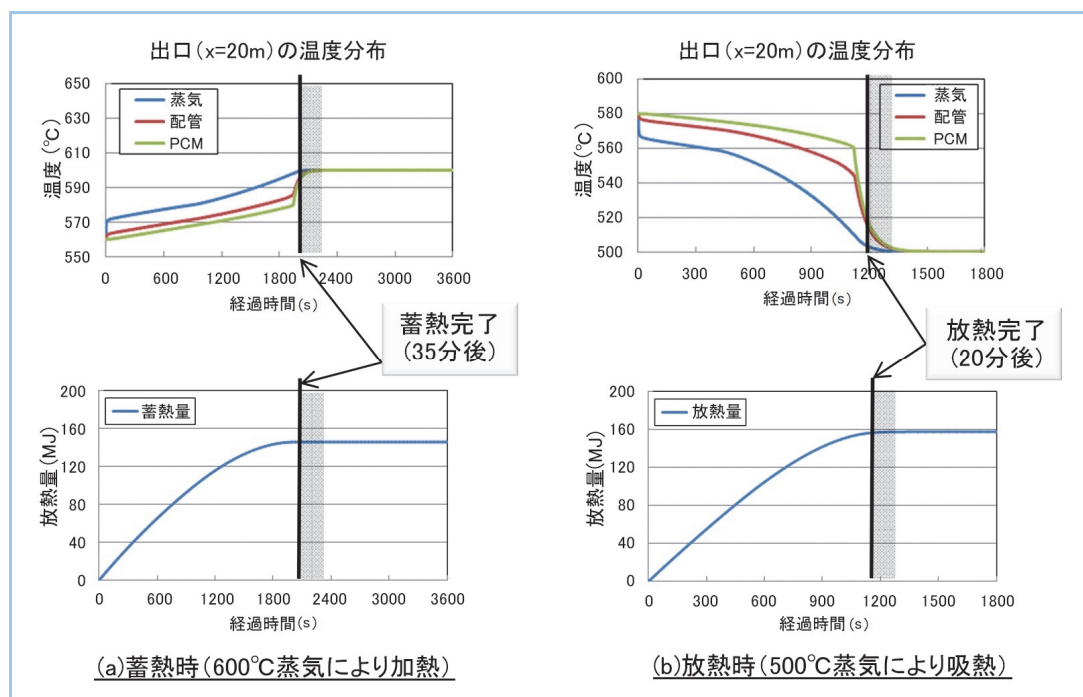


図9 金属 PCM を用いた蓄熱式熱交換器の伝熱解析例
(出口部での温度等の非定常変化)

3.3 放熱時の蒸気・水サイクルへの影響評価

放熱時に発電所の蒸気・水サイクルで問題が発生しないことを、中温域(300℃級)で高圧給水加熱器系統に放熱する過渡応答シミュレーションで確認した。図 10 にその結果を示す。100%定格負荷時に 15%流量の高圧給水をバイパスして蓄熱式熱交換器から高圧給水へ放熱する際の発電機出力他の挙動を確認した。放熱開始に伴ってプラント挙動に過渡的な変化がみられるが、各プロセス値はすべて許容値内であり問題はない。放熱完了([蓄熱体出口温度]<[給水ヒータ出口温度])となった時点で通水停止するなどの運用となるが、通水を継続した際の挙動も評価しており、プラント挙動に大きな影響はなく定格出力維持可能であることも確認した。

高温域(400℃～600℃級)からの放熱による過渡応答は今後シミュレーションによって確認し、ボイラ伝熱面の温度挙動に問題ないようなバイパス比を決定する。

なお、蓄熱する際の開始時は急速な弁操作を避ける、また蓄熱体を出た蒸気は復水器等へ回収するといった思想に基づいて運用することから、蓄熱システムの過渡応答がプラント挙動へ影響を与えることはないと判断した。

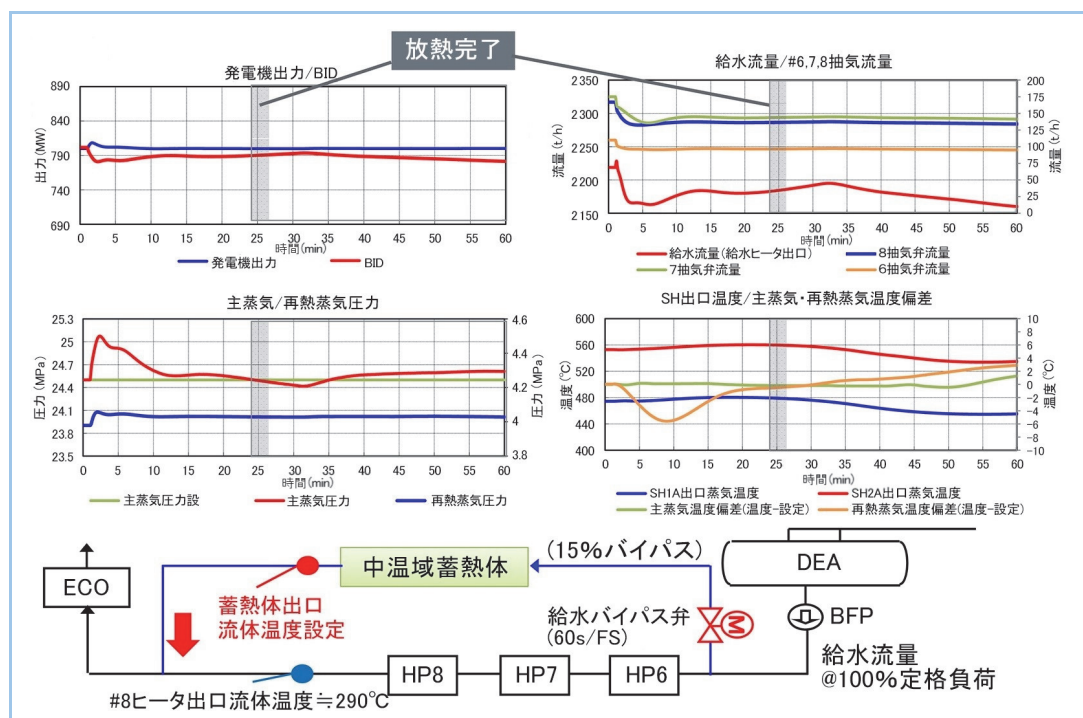


図 10 放熱時の過渡応答シミュレーション結果(高圧給水加熱器系統への放熱)

3.4 蓄熱システムの開発課題と実用化

蓄熱材料の選定においては、熱容量が大きく、熱伝導率の高い材料が望ましいが、一方で腐食性の評価とその対策、及び価格に注意しながら選定を行いシステム全体の経済合理性を確保する必要がある。

蓄熱装置としての熱交換器は、特に金属 PCM 等の腐食性のある蓄熱材を用いる場合に耐腐食性とコーティング材の健全性(割れ、剥離、自己修復性等)が必要となり、それらの点に配慮しながら開発・実用化を進めていく。今後のパイロット規模の実証試験に向けて今年度は当社 Gr の総合研究所で基礎的な試験を実施し 2025 年からの社会実装を目指す。

4. 試設計と経済性評価

蓄熱システムを既設火力発電所へ組み込む試設計と経済性評価を概略行った。図 11(a)は熔融塩と同等の熱容量の蓄熱材で構成すると仮定したイメージ図で、既設の構内に十分納めることが可能である。金属 PCM を蓄熱材とするシステムでは更にコンパクトに配置できる。図 11(b)は蓄エネルギー当たりの価格をほぼ同様な機能を持つ蓄電システム、揚水発電所と比較したものであ

る(揚水は建設費をある仮定の下で試算した超概算の参考値)。蓄熱システムを工夫することによって蓄電システムと同等以下の価格で実現することが可能であるとの概算結果を得た。これに2.3の省エネルギー効果(約2%~6%)の価値を反映すれば、さらに蓄熱システムの経済性が向上すると考えられる。今後、社会実装に向けて開発・実用化を継続していく。

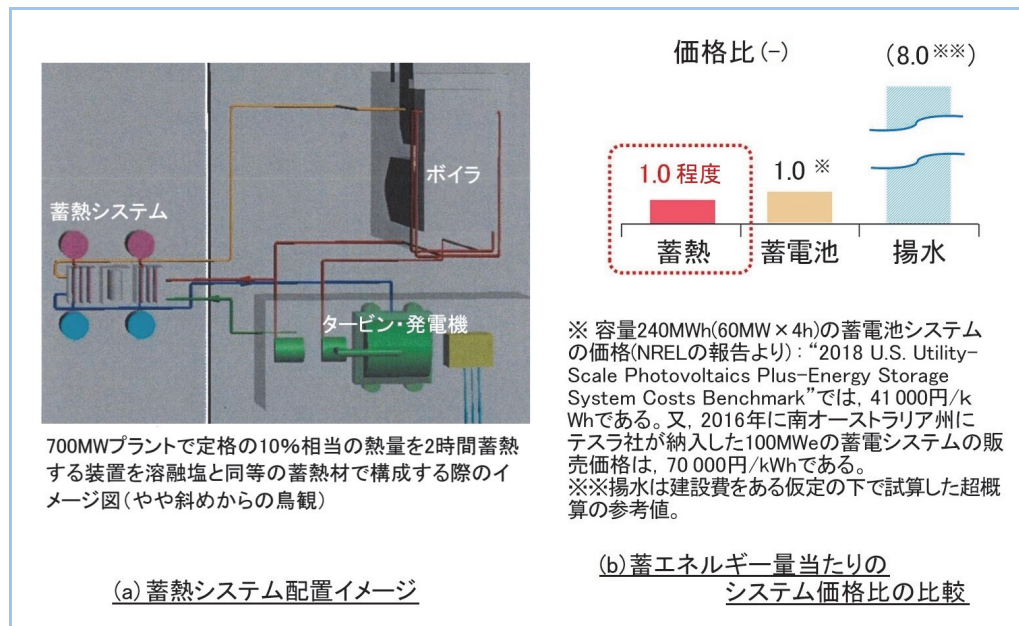


図 11 蓄熱システムの配置イメージ及び価格試算

5. まとめ

再生可能エネルギーが伸長する時代に対応する電力レジリエンス機能として、火力発電所の出力調整力と予備力の向上を、蓄熱システム(タービンバイパス系統、汽水分離器ドレン系統に蓄熱装置を設置)によって実現する場合、蓄電システムや揚水発電に比べて約2~6%程度の省エネルギー効果があることを示した。蓄熱システムを工夫することで既設の火力発電所の構内に十分納まる大きさで実現可能である。経済性の観点からは、蓄電システムと同等もしくはそれ以下の価格を実現することが可能と考えられる。今後も社会実装に向けて開発実用化を推進していく。

参考文献

- (1) RWE, “Sector coupling - a key for the energy transition and security of supply”, 12th VGB-TENPES Technical exchange meeting, 26th-29th February, 2019 Tokyo, Japan
- (2) 九州電力データブック 2019
- (3) VGB-TEPES 技術交流会(2019年2月26日) “Operation of Thermal Power Plants to Accommodate PV Output in Kyusyu”
- (4) 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, pp11-12, pp435-440(原著はFriedrich Müenzinger, Dampfkraft: Berechnung und Bau von Wasserrohrkesseln und ihre Stellung in der Energieerzeugung, 2 aufl, Berlin, Julius Springer, 1933)
- (5) Takahiro Nomura et al., Microencapsulation of Metal-based Phase Change Material for High-temperature Thermal Energy Storage, Scientific Reports, 2015
- (6) 北海道大学, 高温蓄熱システムのための次世代潜熱蓄熱材料の開発, https://metec.messe-dus.co.jp/fileadmin/essj/uploads/essjpresentations_2017/1108-Tec-4-2-HOKKAIDO_UNIV_-_Mr_Nomura_-_JPN.pdf
- (7) Ming Liu et al., Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage system, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2012, p.2118-2132
- (8) E.Risueno et al., Zinc-rich eutectic alloys for high energy density latent heat storage applications, Journal of Alloys and Compounds, Volume 705, 25 May 2017, p714-721
- (9) 劉 植秀, エリスリトール/マンニトール混合蓄熱材の蓄・放熱挙動に関する研究, 岡山大学大学院 自然科学研究科, 2012