

発電電力の安定供給に向けて —IBMの先進の発電量予測技術と新しい太陽光発電システム

欧州では、2020年までに20%の温室効果ガスの排出削減、新エネルギー導入、省エネルギーを目標としたEU指令に導かれ、再生可能エネルギーの導入量が拡大しています。同様に、米国の景気浮揚対策の一つとして打ち出されたITを駆使した送配電設備のインフラ整備と、新需要の創出を目的としたスマート・グリッドに後押しされる形で、再生可能エネルギーの導入が拡大してきました。IBMでは、このような動きに即座に対応し、新たに生まれる問題・技術課題を関連業界と協議し解決することを目的とした「スマーターエネルギー・リサーチインスティテュート (SERI)」を設立しました。

国内では、再生可能エネルギー(太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス)による発電電力を、電力会社が一定期間、一定の価格で買い取ることを義務付けた固定価格買取制度(FIT)が2012年7月より実施されたことにより、2015年1月末にはその認定容量が総量で7507万kWに達しています。認定容量の大部分は太陽光発電(7162万kW)であり、2030年に5300万kWとした政府の太陽光発電の導入目標を既に上回る出力容量となっています。しかしながら、太陽光や風力による発電は天候により発電出力が変化するため、電力需給バランスを維持しながら系統へより多くの発電電力を供給するには、精緻な気象予測などを用いて確度の高い発電量予測を行う必要があります。

IBMは15年前から、狭域を対象とした精細な数値気象予測の研究を開始し、防災、農業、交通などの分野においてその実績を示してきました。また数値気象予測の積極的な応用を進め、数値気象予測とアナリティクスを統合した再生可能エネルギー発電量予測システムや、特定の気象モデルに依存しない機械学習ベースの日射量予測技術を開発しました。IBMはこれらの技術により、再生可能エネルギーをより確かなエネルギー源とするべく業界への貢献を続けています。

また、太陽光発電に関わる基礎技術では、光エネ

ギーの変換効率が理論値に近づきつつある単接合の結晶シリコン系太陽電池や薄膜太陽電池ではなく、実装レベルで変換効率が40%を超えるIII-V族の多接合太陽電池を用いた集光型太陽電池システム「HCPVT」(High Concentrating Photovoltaic Thermal: 冷却排熱併給型超高集光太陽電池システム)をスイスDSolar社と共同開発しました。集光倍率を世界最高の2000倍とすることで必要となる高価な太陽電池の面積を小さくし、大型コンピュータのCPU冷却技術を応用し高熱となる太陽電池モジュールを効率良く冷却することで、電力と熱エネルギーを同時に外部に供給することができます。

本稿では、IBMの再生可能エネルギーに向けた取り組みの中から、太陽光・風力発電活用の肝となる先進の発電量予測技術について解説するとともに、今後拡大が期待されるユニークな光エネルギー変換システムであり、世界一の集光度を誇るHCPVTについてご紹介します。

スマーターエネルギー・リサーチインスティテュート (SERI: Smarter Energy Research Institute)

スマーターエネルギー・リサーチインスティテュート(SERI)は、電力・ガスなどの公共事業の分野において、より先進的に事業を営むことを目的とした共同研究事業を推進するコンソーシアムで、2012年に立ち上げられました。IBMの広範なビッグデータ・アナリティクス技術を応用し、供給停止作業計画の最適化(outage planning optimization)、設備管理の最適化(asset management optimization)、再生可能エネルギー源および分散型エネルギー源の系統への連携(integration of renewables and distributed energy resources)、電力系統広域監視制御(wide-area situational awareness)、参加型電力網(participatory network)など、スマート・グリッドの実現に不可欠なテーマに関して、コンソーシアム会員と共同研究を進めています。また、1年に1回、電力・ガス事業者を中心に広く参加者を募って公開型のSERIコンファレンスをワトソン・リサーチ・センターで開催し、業界の発展に貢献しています。



1. なぜ気象予測技術が必要なのか

太陽光や風力などの再生可能エネルギーを用いた発電は、その発電量が気象に大きく依存するため、安定した電力供給が一般的には難しく、発電電力を送配電網に安定した電力として投入するには、定めた時刻における供給電力量をより確かなものにする必要があります。また、発電量の揺らぎを吸収するために装備される蓄電池は、経済的には容量を最小にすることが要求されます。そこで、先々の時刻、例えば1日先の保有発電設備の発電量予測をより高い確度で行うことで、供給電力量の信頼性が向上し、発電所の経済性を高めることが可能となります。再生可能エネルギーの発電量予測は、このような要請から生じてきました。

発電量予測システムの基本的構成は、日照、風速・風向、気温などの気象変数を予測する「数値気象予測」と、気象変数を入力とした発電設備の「発電量予測」の2つです。IBMでは、米国環境予報センター(NCEP:National Centers for Environmental Prediction)などが提供する広域の数値気象予測を加工して、IBMが開発した対象地域の精緻な気象モデルへ入力し、時間、空間的に粒度の高い気象変数予測を行っています。

2. IBMの数値気象予測システム

[1]数値気象予測エンジンWRFと「IBM Deep Thunder」

確度の高い発電量予測に用いられる数値気象予測とは、大気の振る舞いを数学的にモデル化し、緯度、経度、高度、

時間軸で数値的に解析することで、温度、湿度、風速、風向、降雨状態、降雨量、雲の発生、日射量などを求めるものです。数値気象予測研究開発における標準的な気象モデルには、米国大気研究センターNCAR(National Center for Atmospheric Research)などが開発した汎用気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting)があります。ただし、最適なモデル開発には気象学や経験に基づいた深い技術が必要であり、WRFを利用しているからといって正確な気象予測ができるわけではありません。IBMではWRFを基本気象モデルとして採用した狭域精緻気象予測・解析システム「IBM Deep Thunder」(以下、Deep Thunder)を開発し、再生可能エネルギーへの応用だけでなく、気象変化に鋭敏な事象(洪水予測、交通渋滞管理、車両運行管理、農業、ロジスティクスなど)の事態予測に应用しています(図1)。

[2]Deep Thunderと数値気象予測

Deep Thunderの気象予測は次に示すステップで行われます。

- ①GIS(Geographic Information System)などから、気象予測対象領域の地形、土地利用、植生データなどを取り込み、当該地域の気象モデルを作成します。さらに、当該地域の過去の気象データを基に気象モデルをチューニングし精度を高めます。
- ②この気象モデルに、米国環境予報センター(NCEP)が無料で提供する全球モデルの気象データ(GFS:Global Forecast System、データ格子点間隔55km、予測時間間隔3時間)を初期値、境界値として入力し、

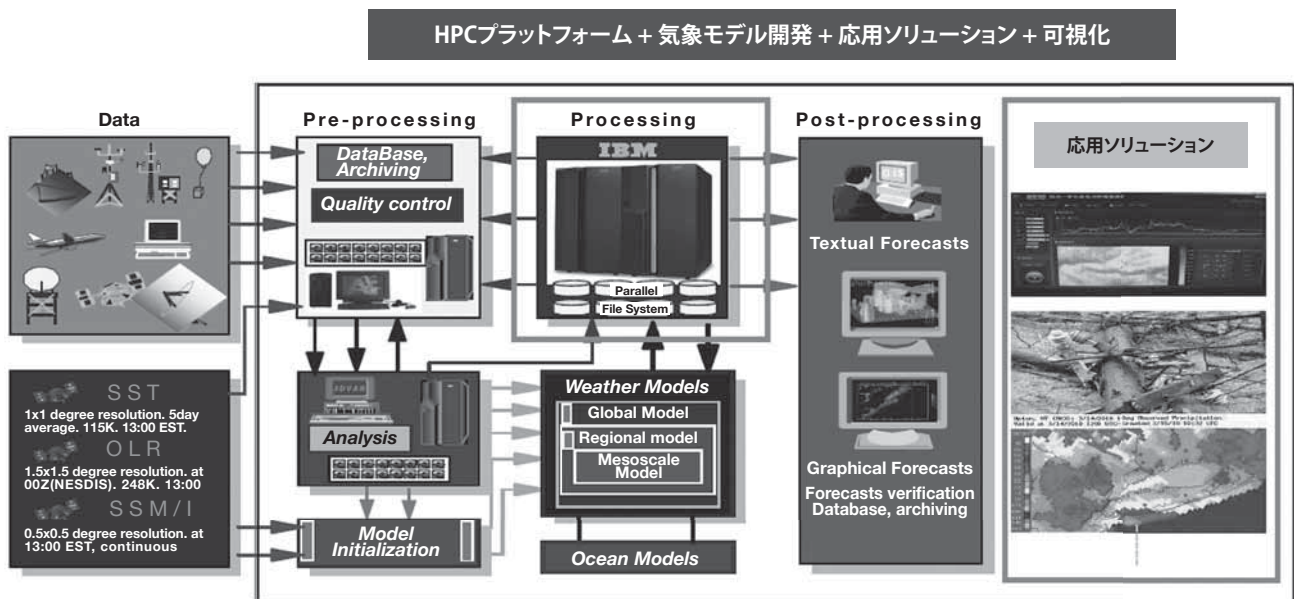


図1. Deep Thunder システム構成

対象とする領域を、水平解像度を1km以下、時間間隔を分刻みとして解析します。

実際には、地表において観測された対象領域における気象変数を、アンサンブル・カルマン・フィルターなどによりデータ同化させることで、気象モデルに入力される初期値の確度を高め、24時間先、48時間先などの気象予測の確度を高めています。ここでいうデータ同化とは、気象モデルへの入力である初期値に実際の気象観測値を取り込み、初期値の確からしさを上げる方法のことです。データ同化には数多くの仮定、パラメーターがあり、その決定には経験に基づく技術的判断が必要とされ計算コストも高いため、民間レベルで効果的なデータ同化を行うことは容易ではありません。また、日射量など気象庁の天気予報では与えられない気象変数について、雲の発生を予測することで確度の高い予測を行うことができます。

図2に10分刻み48時間先までの気象を予測した解析結果のアニメーション表示のスナップショットを示します。水平解像度1km、大気鉛直方向層数65*で解析されたものであり、雲の発生・消失、地表面での降雨量が示されています。

*地表からの気象変化を考慮するために、高度約20kmまでの大気層を何層に分けて計算するかを示すもので、一般に数値が大きいほど正しく気象変化を捉えることができるが、計算量は飛躍的に増える。65は最大級。

3. IBMの再生可能エネルギー発電予測ソリューション

[1] 数値気象予測ベース:ハイブリッド・データ同化型再生可能エネルギー予測ソリューション「HyREF」

再生可能エネルギー発電量予測用途に対してIBMは、変分法とアンサンブル・カルマン・フィルターという2

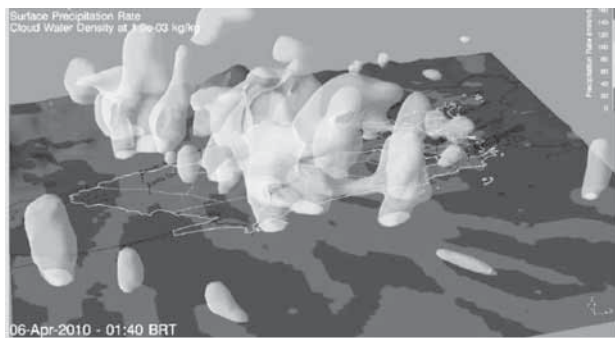


図2. Deep Thunderによる解析例

図2. Deep Thunderによる解析例

つのデータ同化手法をハイブリッドに利用できる再生可能エネルギー発電予測ソリューション「HyREF」(Hybrid Data Assimilation Renewable Energy Forecasting Solution)を開発しました。図3にHyREFのシステム・アーキテクチャーを示します。狭域を高解像に解析する数値気象予測により、1km程度の間隔で予測した気象状態(風速、風向、日照、温度、湿度など)を、過去の気象状態と発電量の関係の統計・確率的分析から作られる発電量予測モデルに入力することで、誤差の少ない発電量予測を行います。例えばHyREFでは、風力発電所における発電量予測の水平解像度を、風力タービンの設置間隔に近い200m程度まで上げることが可能です。

図4には実際の風速予測例を示します。これは、中国国家電網(SGCC:State Grid Corporation of China)の大規模再生可能エネルギー実証プロジェクトである「670MW—張北実証プロジェクト」(風力500MW、太陽光100MW、蓄電池70MW)において実施されたものです。現場は山間に位置する複雑な地形で、縦方向に発生する風が予測結果にもたらず影響が大きく、また発電所は幅1km、全長15kmという広さのため、一つの狭域気象モデルだけでは予測が難しい状況でした。そこで、風力タービンごとの気象観測値を用いてデータ同化することで、タービン単位での発電量予測が可能となりました。予測値(3時に、当日21時から翌日21時までの24時間の風力を予測)と実測値との比較を行った結果、1日先予測における平均予測誤差が8%という極めて優れた予測結果が示されているのが分かります。なお一般に誤差評価には、各時間での予測値と実測値の比較量の、二乗和の平均値の平方根をとった平均二乗誤差(RMSE)が使われます。

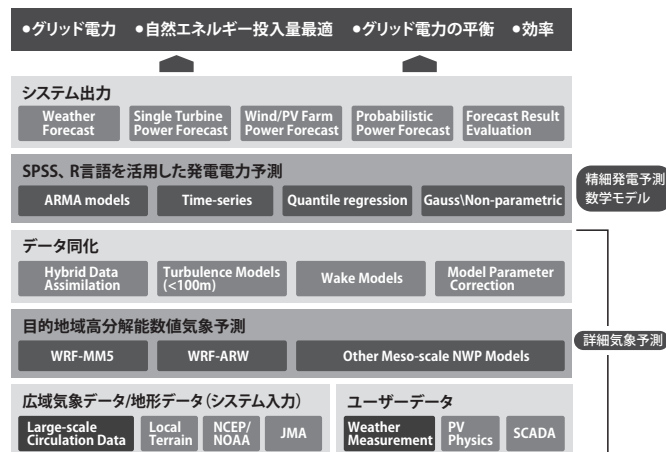


図3. ハイブリッド・データ同化型再生可能エネルギー予測システム(HyREF)のアーキテクチャー

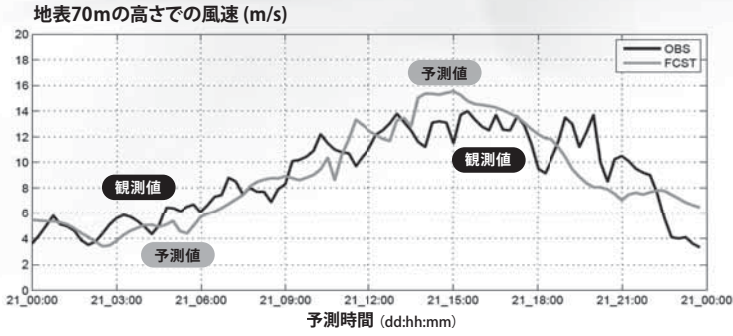


図4. 1日先予測と実測の比較

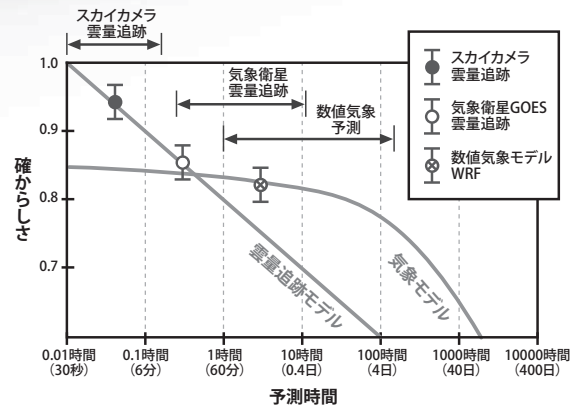


図5. 雲量予測モデルの比較

[2]機械学習ベース:「Watt-sun」によるモデル・ブレンド手法

IBMは、太陽光や風力発電量の予測精度を向上させるための異なるアプローチとして、機械学習を使い複数の気象モデルを統計的に連合させるモデル・ブレンド手法を開発しました。図5がこの手法を簡単に説明したものです。

太陽光発電量と強い相関関係にある日射量を予測するには、雲の形成および散乱といった雲の3次元の物理的性質を捉えるモデルが必要です。それには前章の数値気象予測モデルに加えて、流体を記述する雲量追跡モデルが使われます。数値気象予測モデルは、予測時間が1時間(60分)から100時間(4日)程度までの比較的時間の長い予測に適しています。一方、気象衛星の雲画像データを利用した雲量追跡モデルは、10分程度から10時間後までの予測時間に適しており、太陽光発電所に設置したスカイカメラで撮った上空の雲画像データを利用した雲量追跡モデルは、数分後までの予測時間に適しています。このように複数の雲予測モデルをブレンドさせることで、高い精度で長時間の予測をすることが可能となります。

気象観測データは1日当たり50テラバイト以上あるビッグデータですが、気象モデルに利用されるのは一部です。IBMは、機械学習を利用してビッグデータである観測データと既存の気象予測モデルの出力から予測誤差の相関関係を求め、複数の気象モデルをブレンドして最も精度の高い予測を導き出す技術「Watt-sun」を開発しました。この実証実験が米国エネルギー省のプロジェクトとして2014年に8カ月にわたり行われました。その精度評価は、4つの気象パラメーター(全天日射量、直達日射量、地上10m風速、地上2m気温)を用い、既存の気象モデル(RAP、HRRR、NAM)よりも約30%の平均絶対誤差(MAE)低減を達成しました。これは、Watt-sunが雲底高度、雲柱含水量、雲柱含水量、全雲量などこれまで利用されていなかった観測データと各気

象モデルの精度を学習した成果です。

この機械学習を利用したモデル・ブレンド技術は、今後開発されるであろう新しいモデルを利用することで、さらなる予測精度向上に貢献するものと期待されます。そして、再生可能エネルギーの普及に限らず、他の新たな課題解決にも活用できるものと考えています。

4. 次世代超高集光・冷却排熱併給型太陽電池システム「HCPVT」

[1]世界一の集光度を誇る「HCPVT」

HCPVTは、集光型太陽熱発電で実績を持つDSolar社と、CPUなど高熱を発生する部品の高度な冷却技術を有するIBMの共同開発により実現した、世界一の集光度を誇る太陽電池システムです。製造コストを削減するための工夫が随所に施され、通常の平置き型太陽電池と比較しても価格競争力があり、広く世界市場で受け入れられることが期待されます。

図6にHCPVTの全景イメージを、図7にその断面構造を示します。反射ミラーの台座は六角形で、その対角線長は約9mです。この台座の中に36個の楕円形反射ミラー(mirror facet)を実装し、40m²の投射面積を有しています。反射収束された光は補正レンズ(secondary concentrator)でさらに形状補正を受けた後、多接合太陽電池が実装された受光部であるレシーバー(receiver)に投射され発電が行われます。集光度は、この40m²の投射面積とレシーバーへの投射面積の比を幾何学的集光度として求めたものです。この上部の構造をディッシュ(dish)と呼びます。ディッシュは2軸の太陽追尾装置(slew drive)の上に装着され、高緯度地域においても効率良く太陽を追尾します。

図8にレシーバーのプロトタイプを示します。写真中央にある3×3の配列で実装されたものが高効率の三

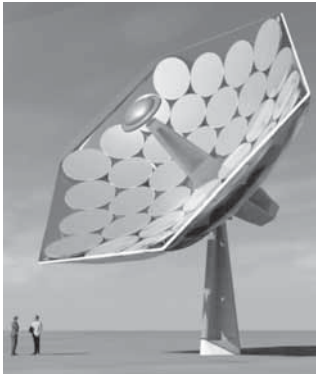


図6. HCPVT全景(イメージ)

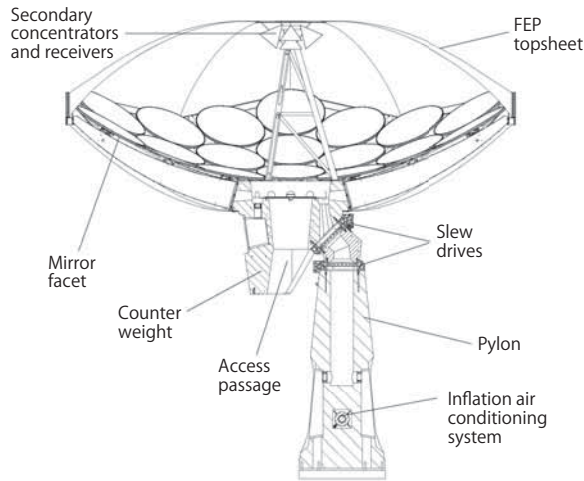


図7. HCPVT構造断面図

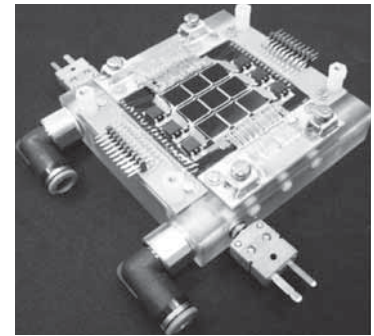


図8. レシーバー(プロトタイプ)

接合太陽電池セルです。この構造では、セル上の平均日射量は $200\text{W}/\text{cm}^2$ に達し、冷却なしでは表面温度は 1500°C になるため、エッチングにより同じウエハー上にマイクロ・チャンネルを設けて冷却水を循環させ、極めて低い熱抵抗(冷却水の温度に対して太陽電池の温度を 5°C 程度高く保つ)を実現しています。この冷却排熱は 95°C 程度となり、熱交換器を経てチラーや淡水化装置などの熱源として利用できます(図9)。

[2]HCPVTの性能と期待される応用

HCPVTは、標準的試験条件(直達日射量: $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、AM1.5、実効ミラー面積: 40m^2)の下で、AC電力として 12kW 、熱出力として 20kW を出力できます。これは入射光エネルギーを 40kW としたとき、電力に30%、熱エネルギーに50%変換されたことを意味し、システム全体としては80%という高いエネルギー変換効率となります。この高いエネルギー変換効率により、単位電力量当たりの発電コストを10セント/kWh以下に抑えることが可能となります。

商用の太陽光発電システムなどに比べ2000倍の集光を実現したことで、高価な高効率の多接合型太陽電池の

利用が経済的に可能となりました。多接合型太陽電池の高い発電効率、冷却排熱の同時供給、低コスト、小さな設置面積などの利点を生かすことで、集光型太陽電池や太陽熱発電単体では成し遂げることが困難だった応用領域において、HCPVTがその性能を十分に発揮することが期待されます(表1)。



日本アイ・ピー・エム株式会社
東京ラボラトリー、ビジネス開発
技術理事

櫻井 秋久
Akihisa Sakurai

長年、数値シミュレーションの製品設計への応用研究、開発に従事。現在、スマートシティ事業領域においてR&D部門のテクノロジーを活用したソリューション、事業開発に従事。IBMディスティングイッシュト・エンジニア。



日本アイ・ピー・エム株式会社
東京ラボラトリー、SW&システム開発研究所
M&Dソリューション開発担当

高山 雅行
Masayuki Takayama

IAサーバー製品やそのシステム管理製品の開発業務を経て、エネルギー管理ソリューションや製造業向けデータ解析ソリューションなど、海外のスマート・グリッド関連プロジェクトのソリューション化に従事。

表1. HCPVTの応用分野

	新興市場・系統への 関係なし応用	成熟市場
考えられる 採用動機	遠隔地 高エネルギーコスト 飲料水不足	利用できる土地の不足、高い価格 「環境配慮型建物」に対する高い評価 異なるシステムの融合、美しさ
見込まれる ユーザー	農場 NGO 遠隔地にある病院	不動産開発 研究機関
	公共施設、都市開発事業 ホテル・保養地管理会社 電気および加熱・冷却を必要とする中小の産業 エネルギー供給事業 など	

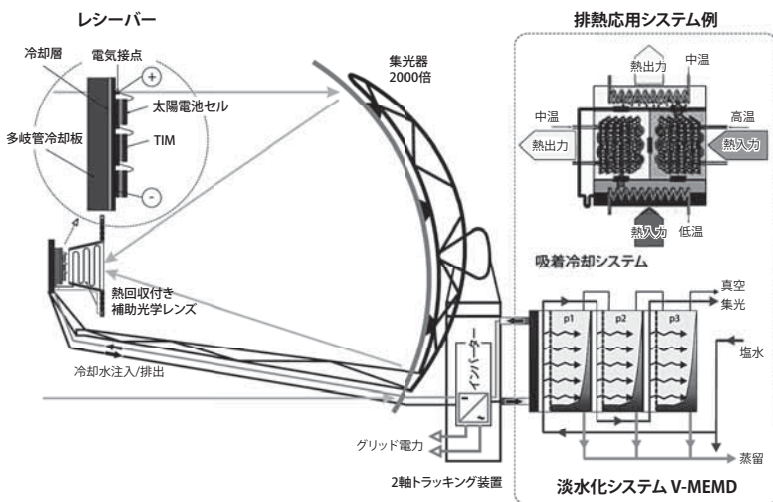


図9. ディッシュと排熱利用機器