

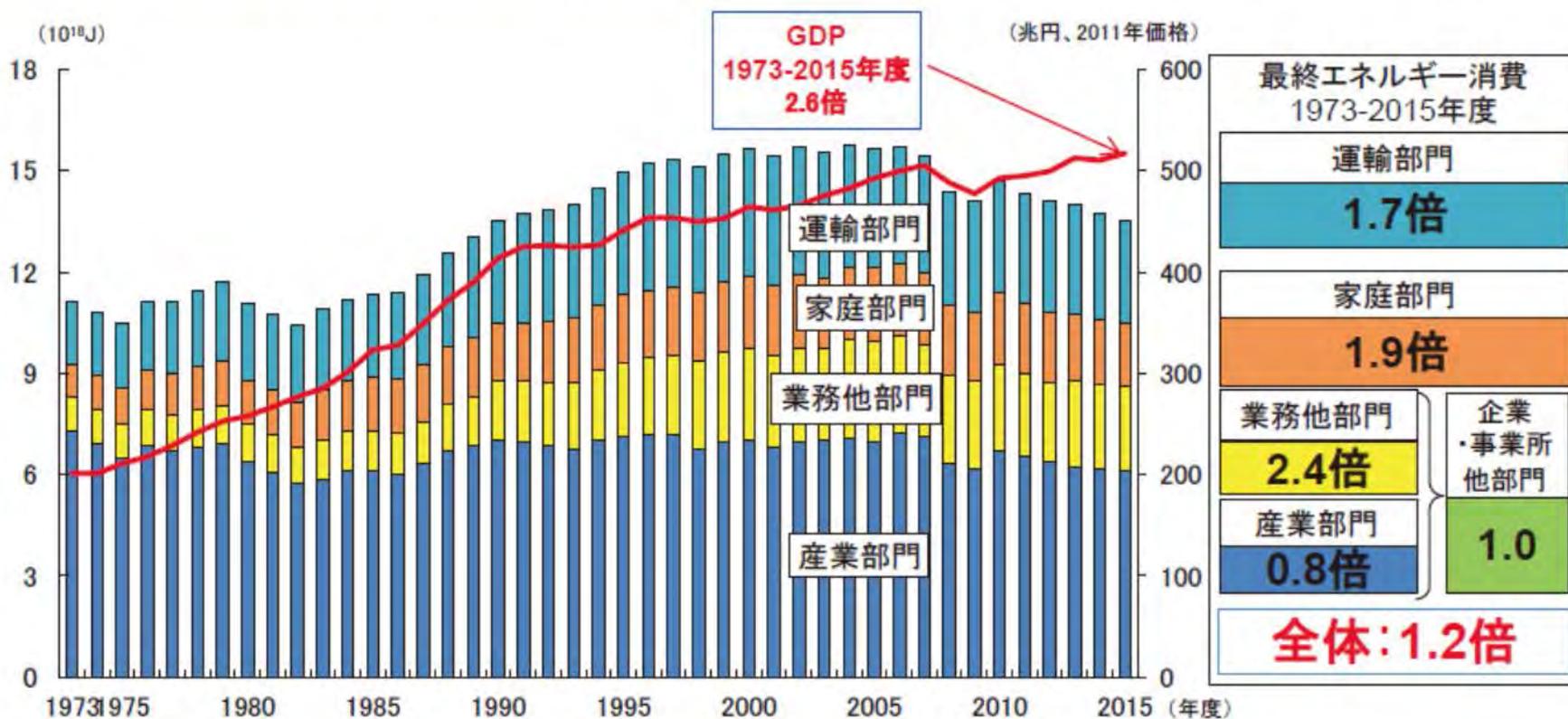
エネルギーシステム インテグレーションとは何か ～建物の視点～

東京大学生産技術研究所

大岡龍三

わが国におけるエネルギー消費量の変遷

【第211-1-1】最終エネルギー消費と実質GDPの推移



民生部門(建築関連)の伸び率が著しい。
建物の省エネルギー化が急務

ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の流れ

2017年4月より、延面積2,000㎡以上の非住宅建築物(新築等)は省エネルギー基準の適合義務化が開始されています。省エネルギー基準に適合した建築物より一歩先へ進んだ**環境建築の選択肢の一つ**としてZEBが注目されています。

ZEBの新たな定義

建築物の実態に応じてZEBを目指すことができるよう、ZEBの概念が拡張されました。第一にZEB Readyを、さらなる省エネルギーを目指す建物はNearly ZEB以上を目指しましょう。



ゼロ
ZEBとは

快適な室内環境を保ちながら、負荷抑制、自然エネルギー利用、設備システムの高効率化により省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギーの導入を目指した建築物です。

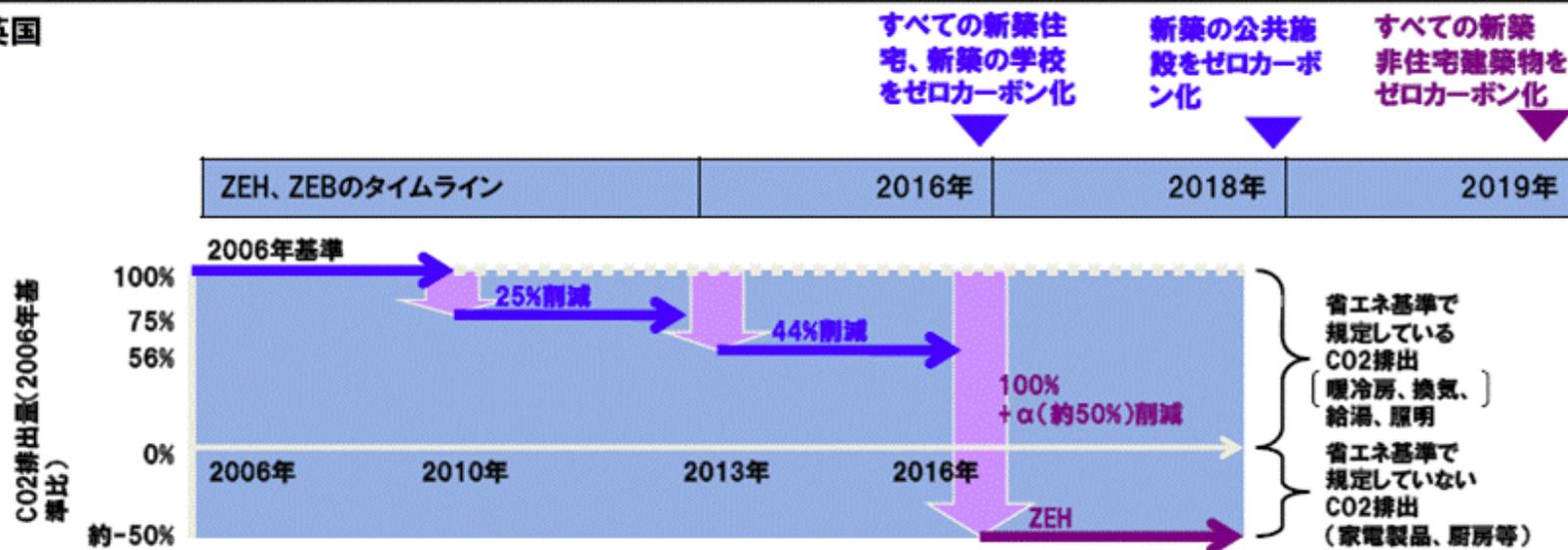
注)エネルギー消費は、空調・換気・照明・給湯・昇降機のみを対象とし、テナント・執務者が使用するOA機器等は、この対象には含まれません。そのため、「ZEB」を実現した場合にもこれらのエネルギー消費は残ります。

ZEBの実現に関する国際動向

米国

- エネルギー自立安全保障法(2007年)において、以下を目的とする「Net-Zero Energy Commercial Buildings Initiative」を規定。
 - ・2030年までに、米国に新築されるすべての業務用ビル
 - ・2040年までに、米国の既存の業務用ビルの50%
 - ・2050年までに、米国のすべての業務用ビルをZEBとするための技術・慣行・政策を開発・普及する。
- 住宅については、市場展開可能な(marketable)ZEHを2020年までに開発することが目標。

英国



EU

- 2020年12月31日以降に新築されるすべての住宅・建築物は、「概ねゼロ・エネルギー(nearly zero energy)」とする。

わが国におけるZEB実現・普及に向けたロードマップ



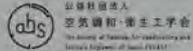
注) ここでのZEBとは、広義のZEBを指す

ZEB事例集パンフレット (空気調和・衛生工学会編)

建築研究所 建築環境工学部 衛生工学 (ZEB専攻)

ZEB in Japan

ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) 先進事例集
Net Zero Energy Building Advanced Case Collection



1 青森市役所新庁舎 Urban City Hall 地域の歴史・風土・資源を活かしたZEB庁舎 ZEB City Hall Commissioned Regional History, Climate and Resources

Energy flow diagram showing various energy inputs and outputs, including solar, wind, and geothermal energy, and their utilization in the building's systems.

Detailed energy system diagram showing the integration of various energy sources and building systems. Includes performance graphs for energy consumption and carbon footprint.

7 東京大学 21 KOMECE 21 KOMECE: The University of Tokyo 大学発のZEBパイロットプロジェクト 2019年開始のZEB

Energy flow diagram for the University of Tokyo building, highlighting its role as a pilot project for ZEB.

Detailed energy system diagram and performance graphs for the University of Tokyo building, showing its energy efficiency and carbon footprint.

2 清水建設本社ビル Shimizu Corporation Headquarters 持続可能な社会に貢献する都市型超環境オフィス Urban High-rise office building serving Sustainable Society

Energy flow diagram for the Shimizu Corporation Headquarters building, illustrating its sustainable design and energy performance.

Detailed energy system diagram and performance graphs for the Shimizu Corporation Headquarters building, showing its advanced energy management and sustainability features.



エネルギーインテグレーションの ための建築エネルギーシステムの 運用最適化

0-1. 最適化の必要性

- 多様な分野で利用される“最適化”



例: 輸送計画

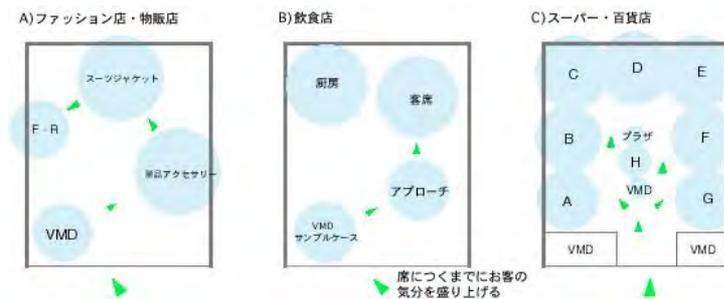


例: バイオ系研究

(<http://www.thermosci.jp/application/biotech-life-science/cell-culture-products.html>)



例: 金融商品



例: 配置計画

(<http://kajagogo.com/layout.html>)



例: 生産計画

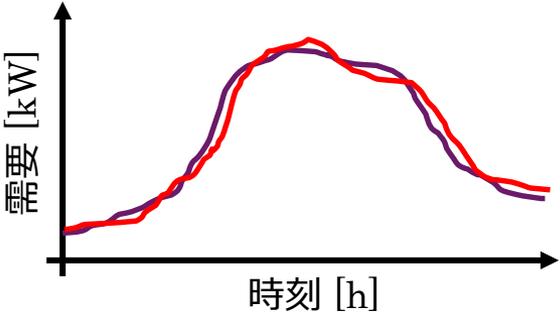


例: プラント最適化

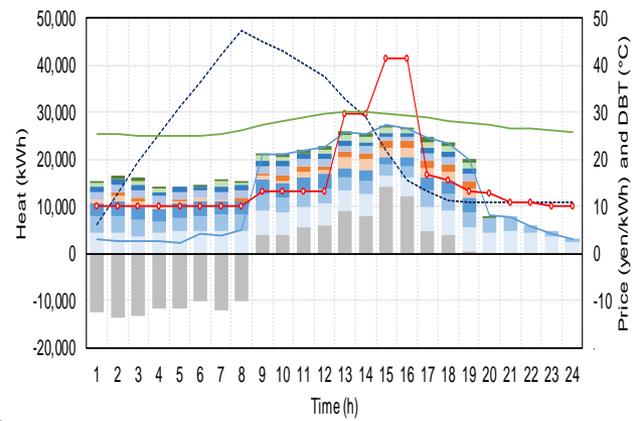
各要素の役割

境界条件の予測

● 需要予測



運用計画の決定

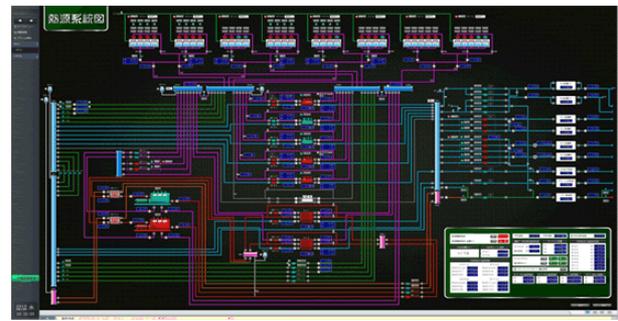


運用計画の修正



オペレータによる修正

or



自動制御プログラム

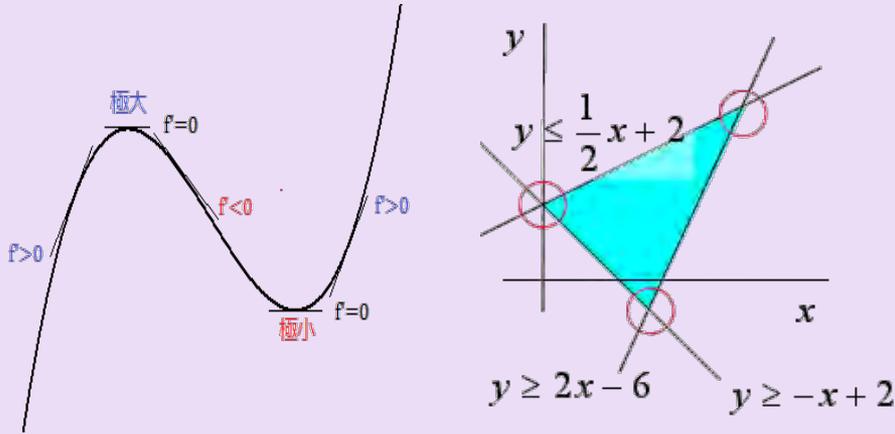
いつ?

どの機器を?

どのくらい?

最適化手法の分類と特徴

数理計画法



■ 代表的な手法

- 極小値・極大値問題 (高校数学)
- 線形計画法
- ラグランジュの未定乗数法

■ 特徴

- 微分など数学的な処理
- 理論最適解が得られる

■ 注意点

- 適用モデルが限定
- 計算量 \propto 変数の数 (指数関数的)

メタヒューリスティクス

Meta

+

Heuristics

高次の

発見的問題解決法

汎用的な発見・学習的探索手法

■ 代表的な手法

- 遺伝的アルゴリズム(GA)
- 粒子群最適化(PSO)
- 焼きなまし法(SA)

■ 特徴

- モデルフリーな手法
- 多くが確率的近似手法

■ 注意点

- 解の近似精度
- パラメータ設定
- 適切な手法の選択

メタヒューリスティクスとは

従来手法：

数理計画法

- 1) Newton 法
- 2) 準Newton法
- 3) ラグランジュ緩和
- 4) ラグランジュの未定乗数法
- 5) シンプレックス法

などなど

微分や代数学的な処理



Newton



Lagrange



G.B. Dantzig
(Simplex method)



提案手法：

メタヒューリスティクス

- 1) 遺伝的アルゴリズム(GA)
- 2) 粒子群最適化(PSO)
- 3) 焼きなまし法(SA)
- 4) 差分進化(DE)

などなど

ランダム性を伴う経験・学習的手法
(人工知能の一種)



J.H. Holland
(Genetic algorithm)



Xin-She Yang



西森 秀稔
(量子アニーリング)

どの最適化手法を選択するか？

順序

1

全探索

2

線形計画法

- 1) 離散問題：整数 + 線形計画法
- 2) 連続問題：線形計画法

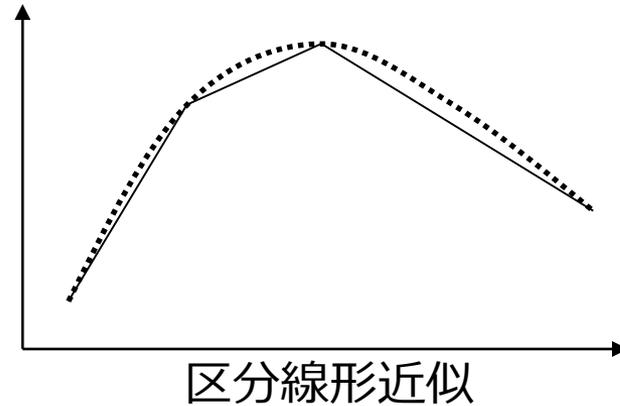
3

動的計画法

操作変数が離散時のみ適用可能

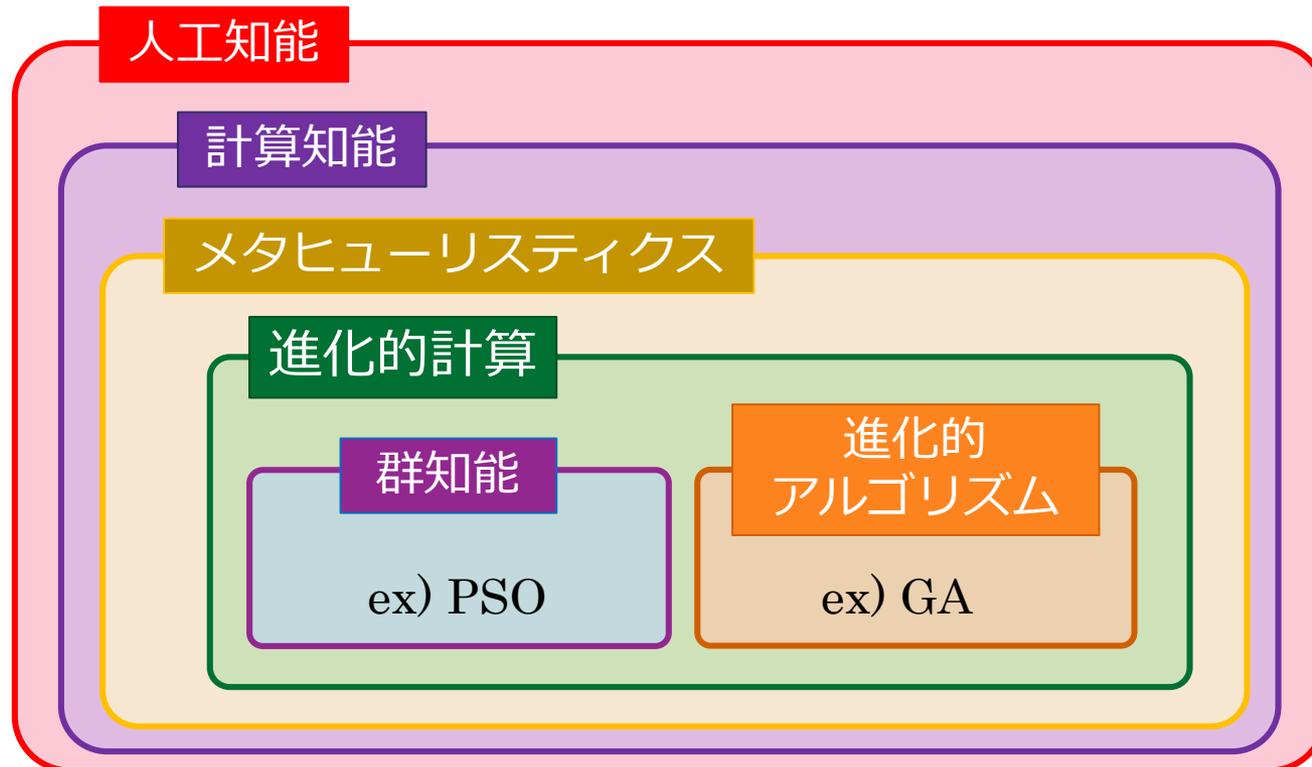
4

メタヒューリスティクス



メタヒューリスティクスの利用

- 計算量 = 個体数 × 世代数 (←両方ともユーザー指定)
- 計算を途中で打ち切ることが出来る
(計算途中で停止し、それまでの最適解を表示可能)



メタヒューリスティクスの分類

メタヒューリスティクス (Metaheuristics)

焼きなまし法 (Simulated annealing)
[Kirkpatrick et. al., 1983]

タブーサーチ (Tabu search)
[F. Glover, 1970s]

山登り法 (Hill climbing method)

多出発局所探索法
(Multiple start local search)

反復局所探索法 (Iterated local search)

確率局所探索法
(Stochastic local search)

誘導局所探索法 (Guided local search)

探索空間平滑化法
(Search space smoothing method)

貪欲ランダム適応型探索法
(GRASP: Greedy randomized adaptive search procedure)

散布探索法 (Scatter search)

GEWA: Generalized evolutionary walk algorithm

Photosynthetic algorithm

Enzyme algorithm

進化的計算 (Evolutionary computation)

群知能 (Swarm intelligence) [1989]

Bee-inspired algorithm

- HBA: Honeybee algorithm [C.A. Tovey et. al., 2004]
- ABC: Artificial bee colony [D. Karaboga, 2005]
- Virtual bee algorithm [X.S. Yang, 2005]

粒子群最適化 (PSO: Particle swarm optimization) [J. Kennedy and R. Eberhart, 1995]

Harmony search [Z.W. Geem et. al., 2001]

Ant algorithm

- 蟻コロニー最適化
(ACO: Ant colony optimization)
[M. Dorigo, 1992]
- VAA: Virtual ant algorithm [X.S. Yang, 2006]

Proposed by Xin-she Yang
• Bat algorithm [2010]
• SLBA: Self-adaptive learning BA [B. Bahmani-Firouzi et. al., 2011]

Firefly algorithm [2008]

Cuckoo search [2009]

- Modified cuckoo search [S. Walton et. al., 2011]

GSO: Glowworm swarm optimization (2005)

Grey wolf optimizer [2014]

AIS: Artificial immune system [1986]

進化的アルゴリズム (EA: Evolutionary algorithm)

進化戦略 (ES: Evolution strategy) [1960s]

- $(\mu+\lambda)$ -ES
- (μ, λ) -ES
- CMA-ES (Covariance matrix Adaptation -ES)
[Hansen et. al., 2001]

差分進化 (DE: Differential Evolution) [R. Storn and K. Price 1996, 1997]

GEP: Gene expression programming [C. Ferreira, 2001]

進化的プログラミング (EP: Evolutionary programming) [L.J. Fogel 1960s]

遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic algorithm) [J.H. Holland 1975]

- 単純遺伝的アルゴリズム (SGA: Simple GA)
- 実数型遺伝的アルゴリズム (RCGA: Real-coded GA)
 - UNDX+MGG型
 - 多親交叉 REX+JGG型

文化的アルゴリズム (Cultural algorithm) [G.R. Reynolds, 1994]

遺伝的プログラミング (GP: Genetic programming) [J. Koza, 1992]

- Cramer's GP
- Binary GP
- Gene expression programming
- Edge encoding
- ...

メタヒューリスティクスの基本

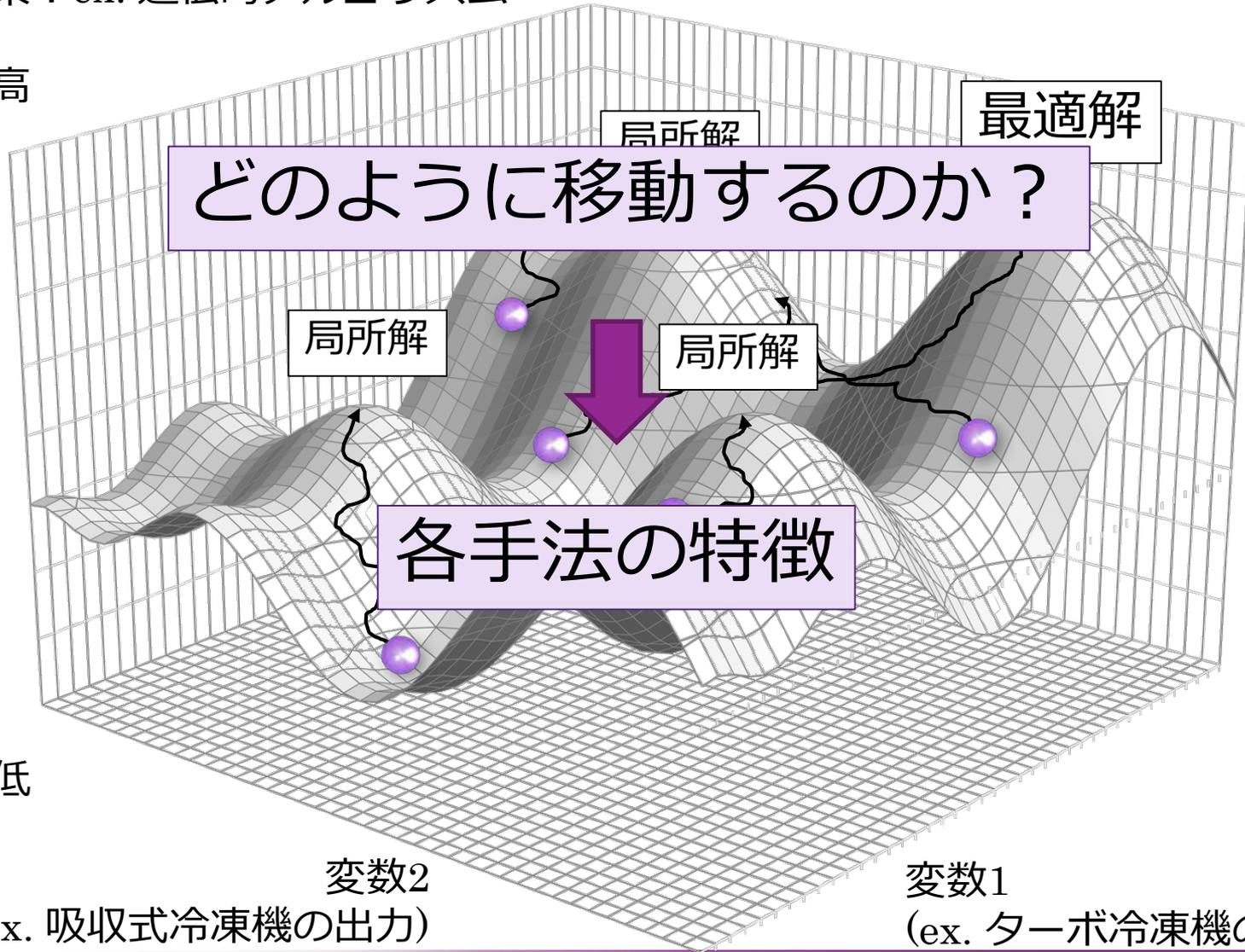
一点探索：ex. 焼きなまし法

多点探索：ex. 遺伝的アルゴリズム

評価：高

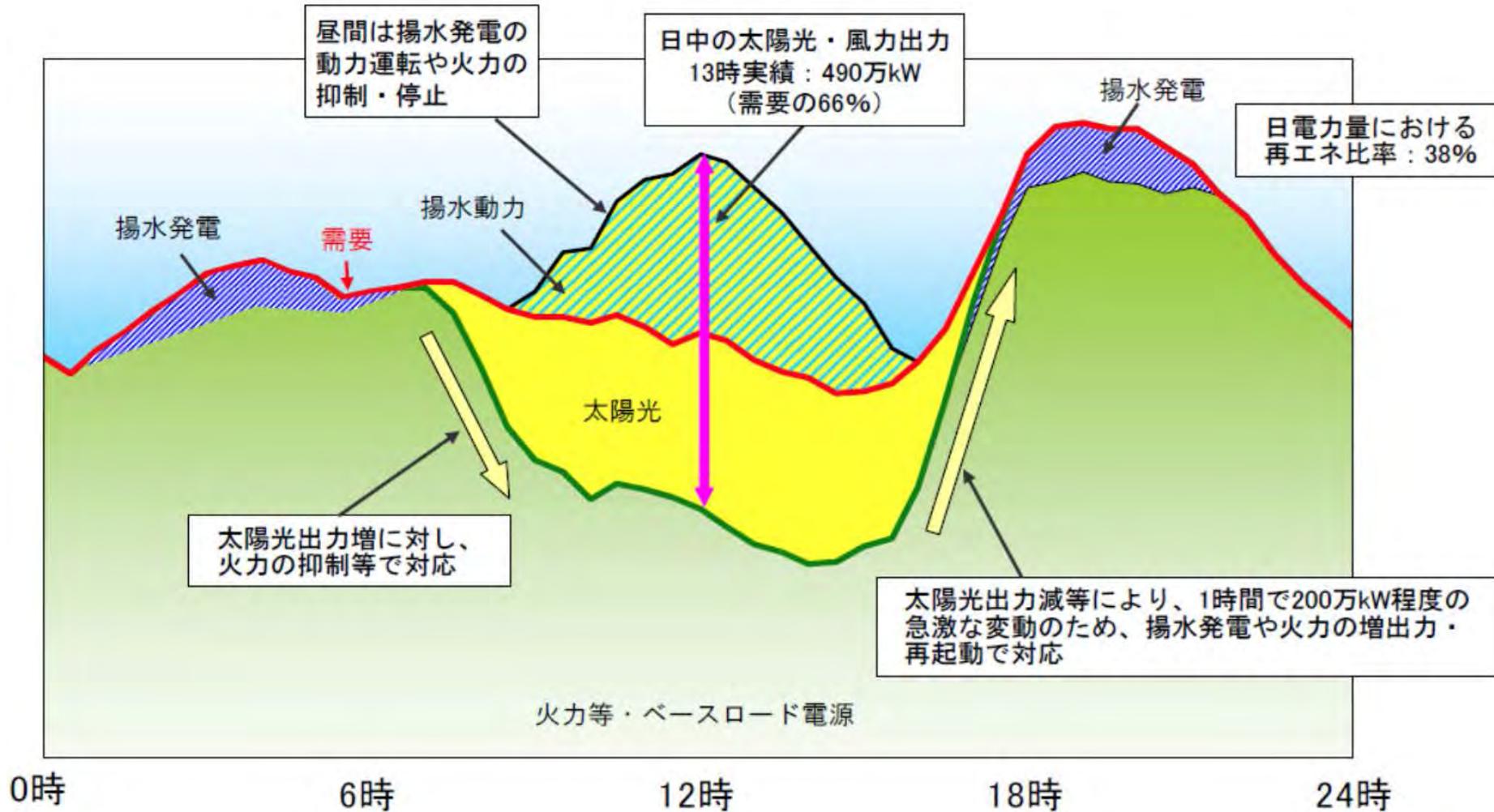


評価：低



変動料金下における
 ϵ DEによる
蓄熱槽を有する
地域エネルギーシステムの
運用最適化

需要と供給のインバランス (平成28年5月4日)



(出典) 九州電力：九州本土における再生可能エネルギーの導入状況と優先給電ルールについて、2016年7月21日揭示

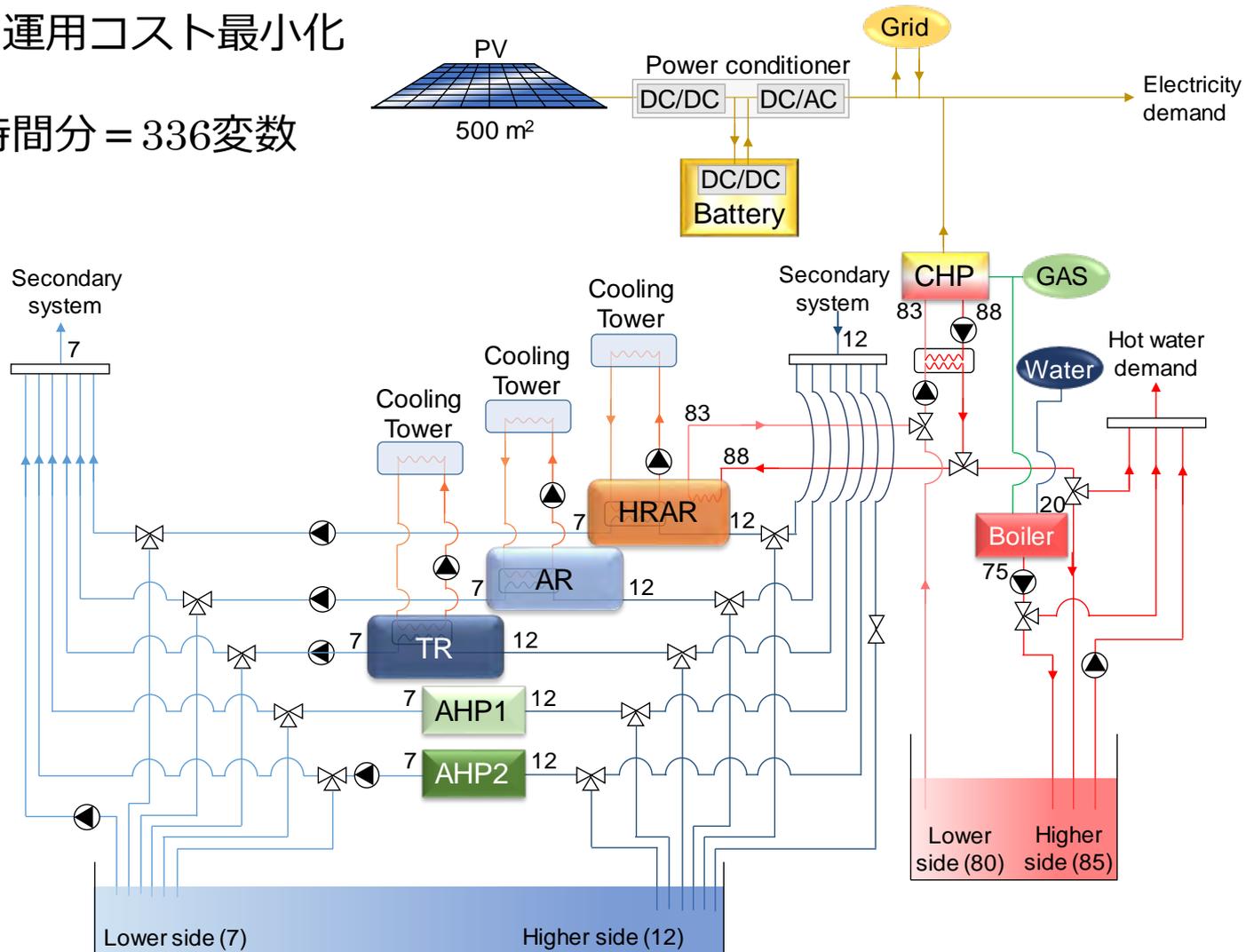
複合熱源システム

- 20000m²のホテルを想定→翌日24時間分の運用計画最適化

目的関数：運用コスト最小化

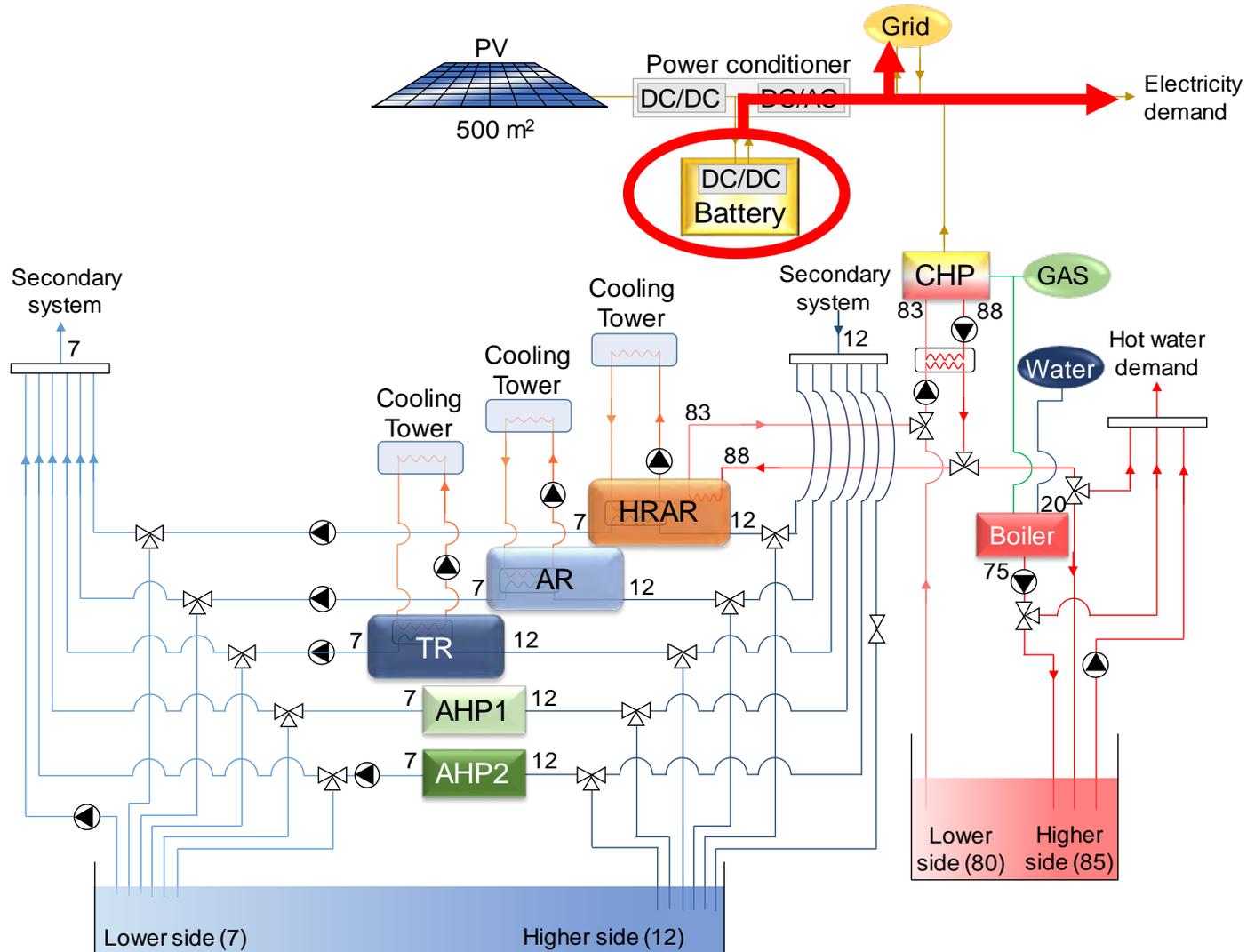
操作変数：

14種類24時間分 = 336変数



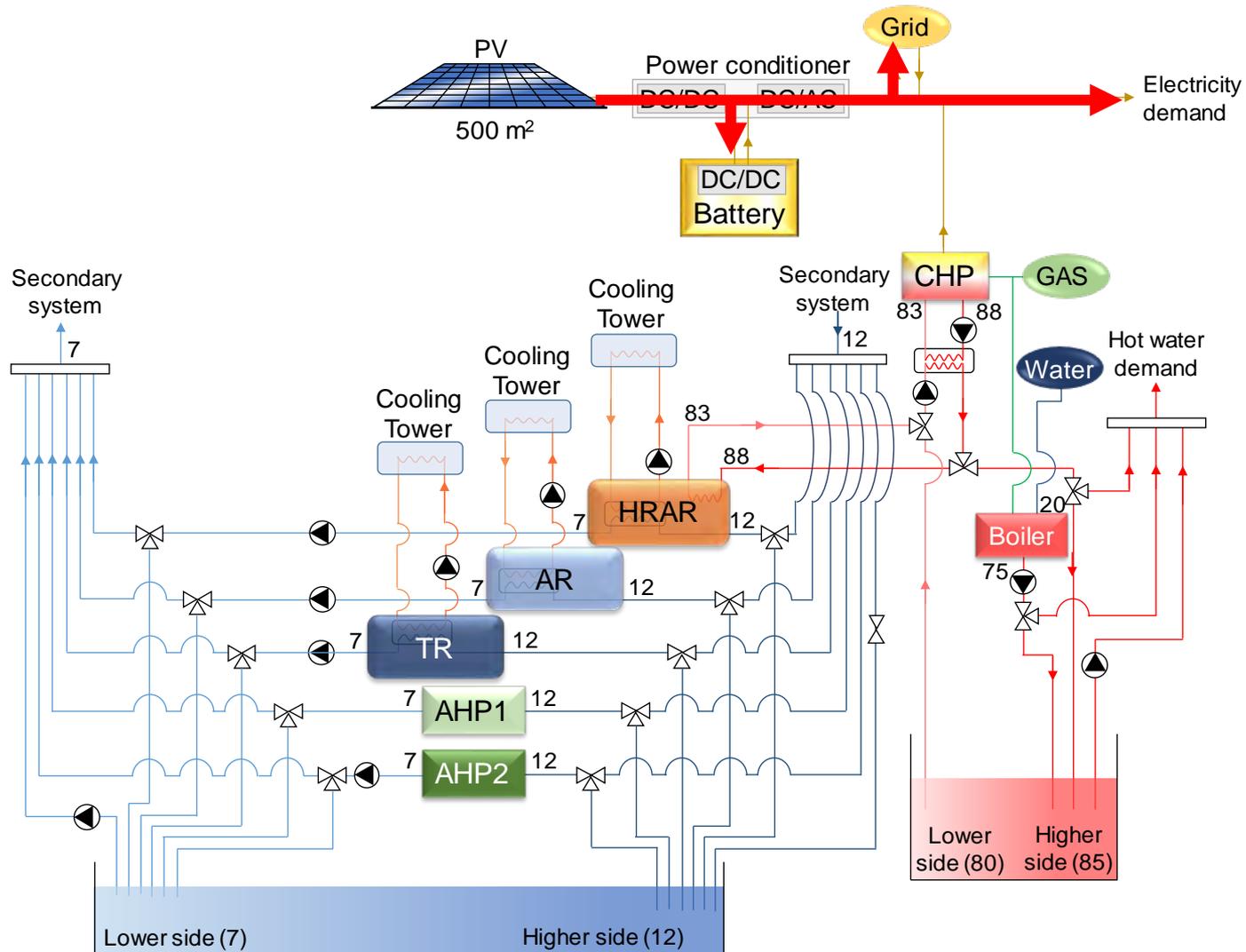
複合熱源システム

- 蓄電池の最適運用 + 分配ルート



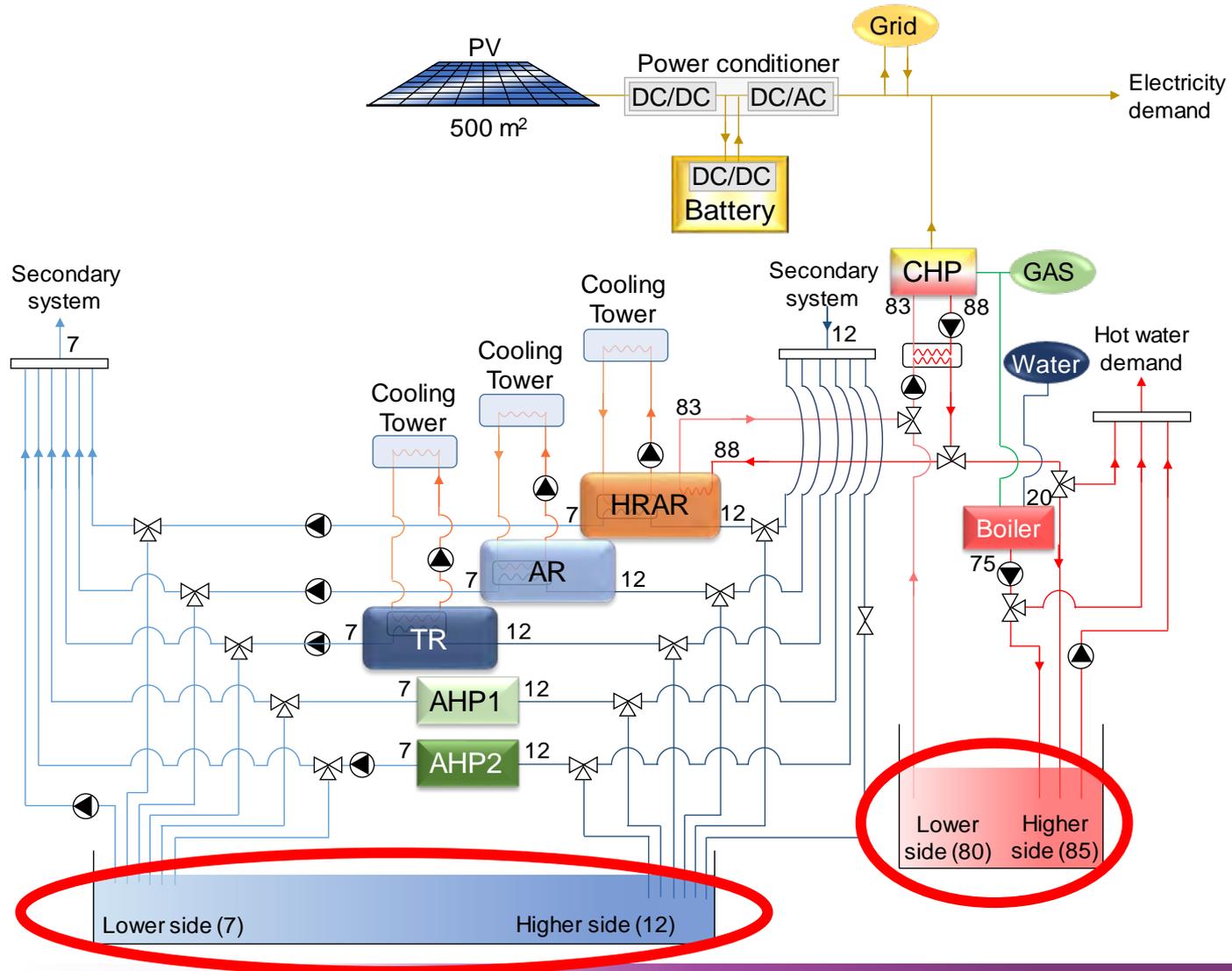
複合熱源システム

- PV発電電力の最適分配ルート



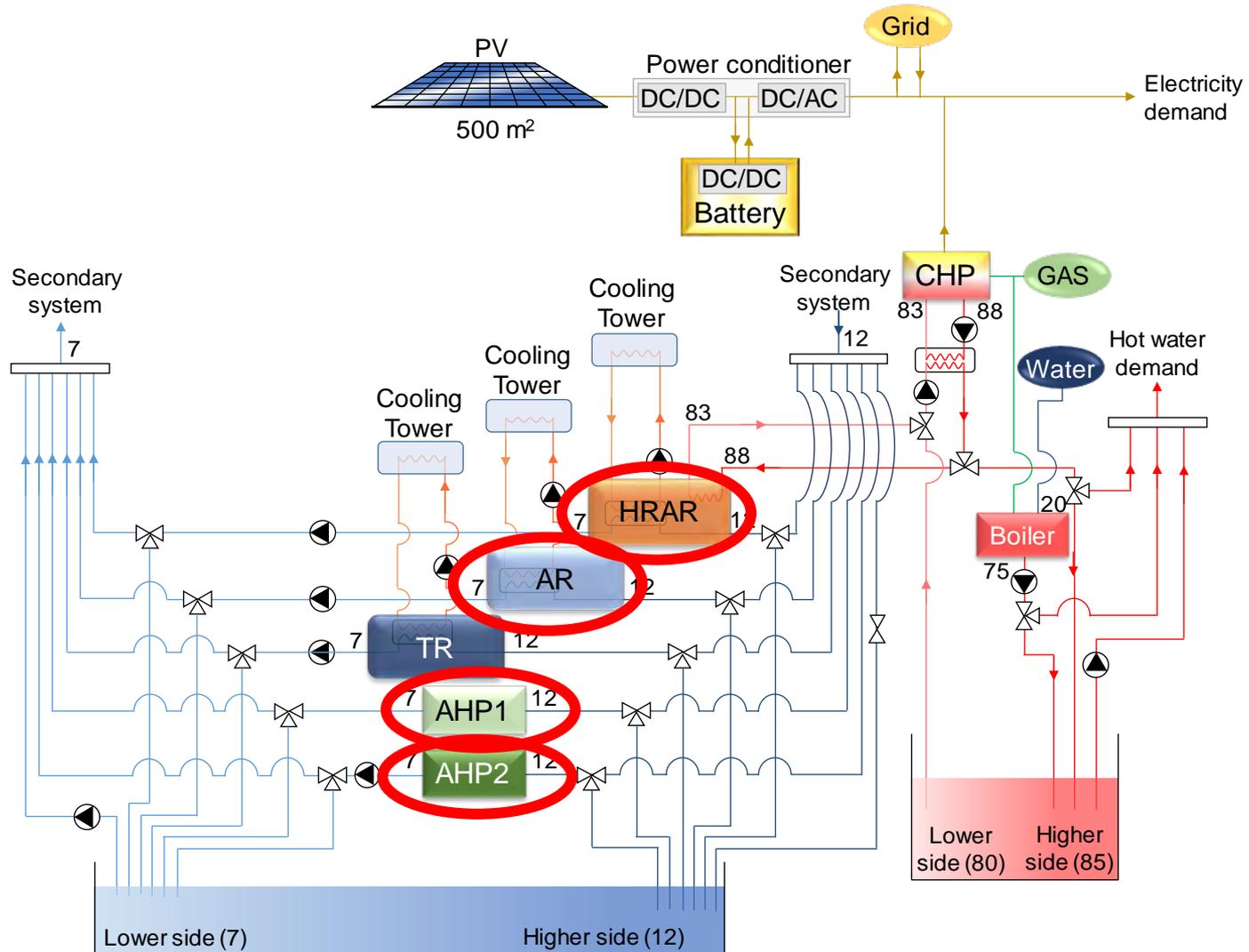
複合熱源システム

- 蓄熱槽の最適運転



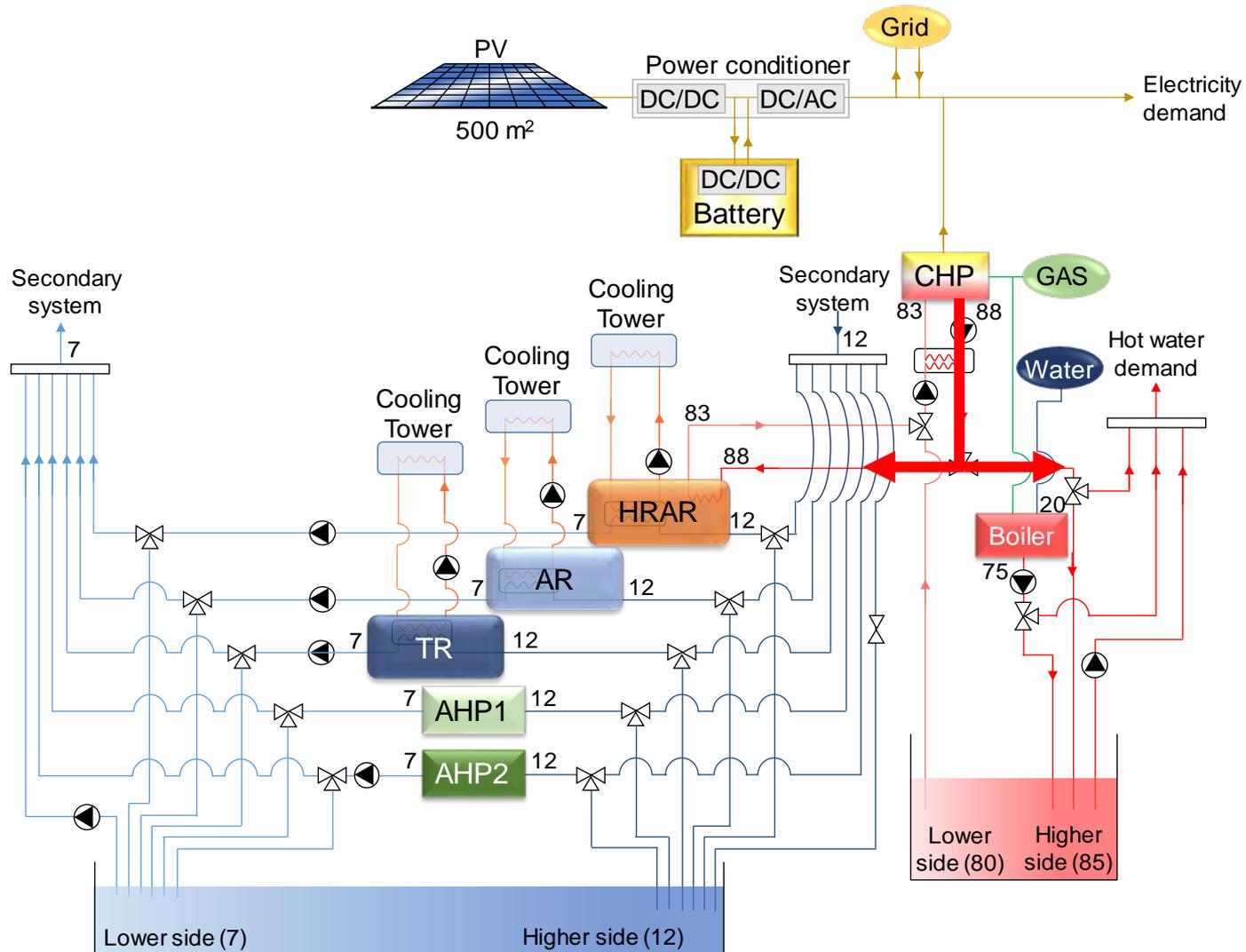
複合熱源システム

- 熱源機の最適運転



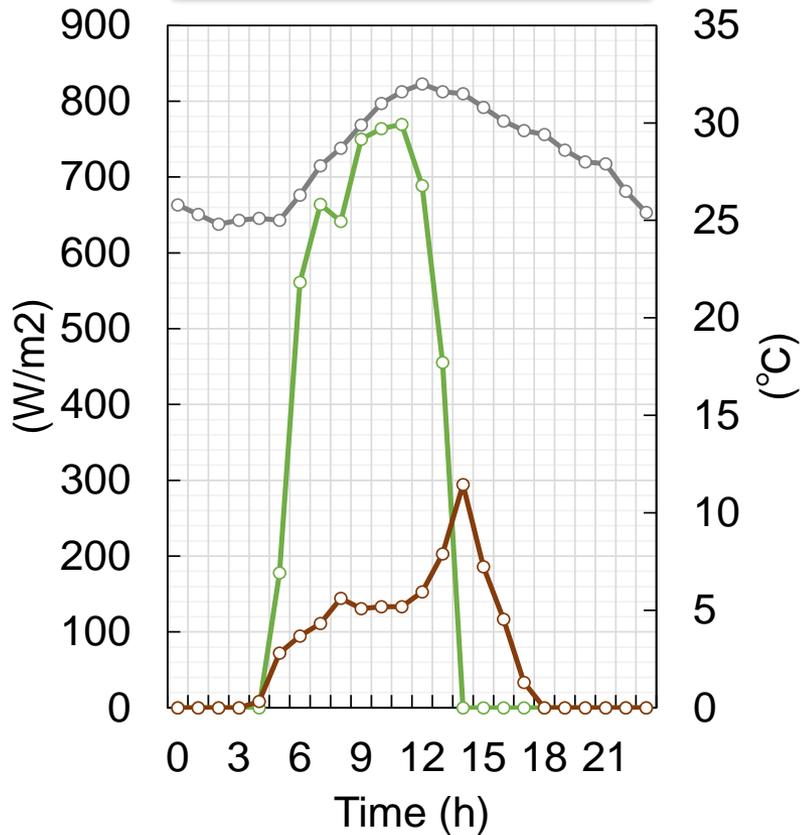
複合熱源システム

- CHPの最適運転 + 最適分配ルート



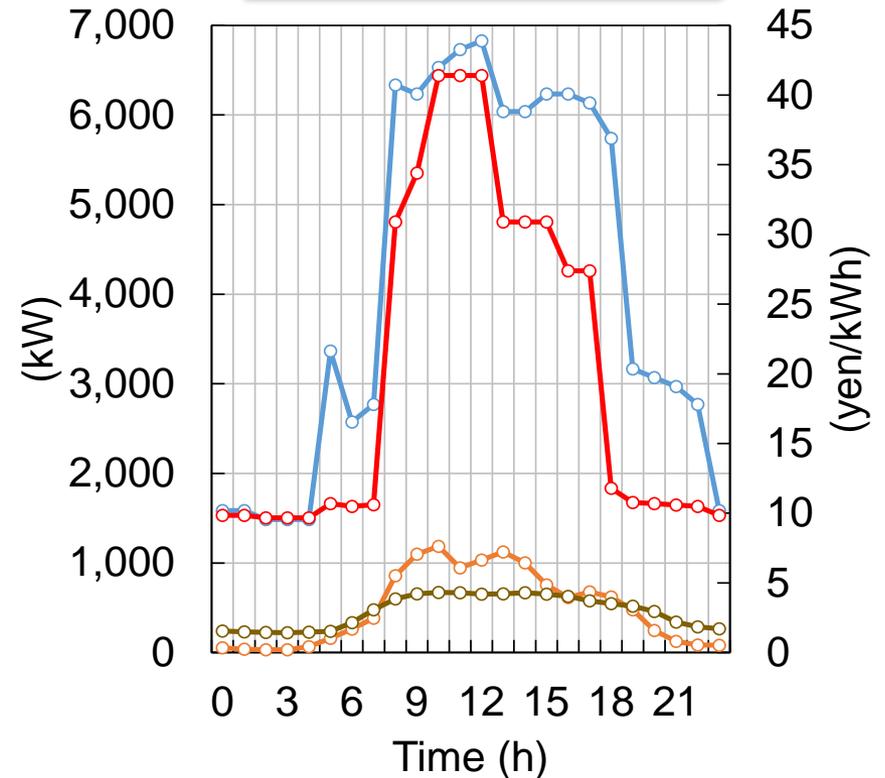
需要と電気料金単価

外気温・日射データ



- Direct normal solar irradiance (W/m^2)
- Horizontal diffuse irradiance (W/m^2)
- Outdoor temperature ($^{\circ}C$)

各種需要・買電単価



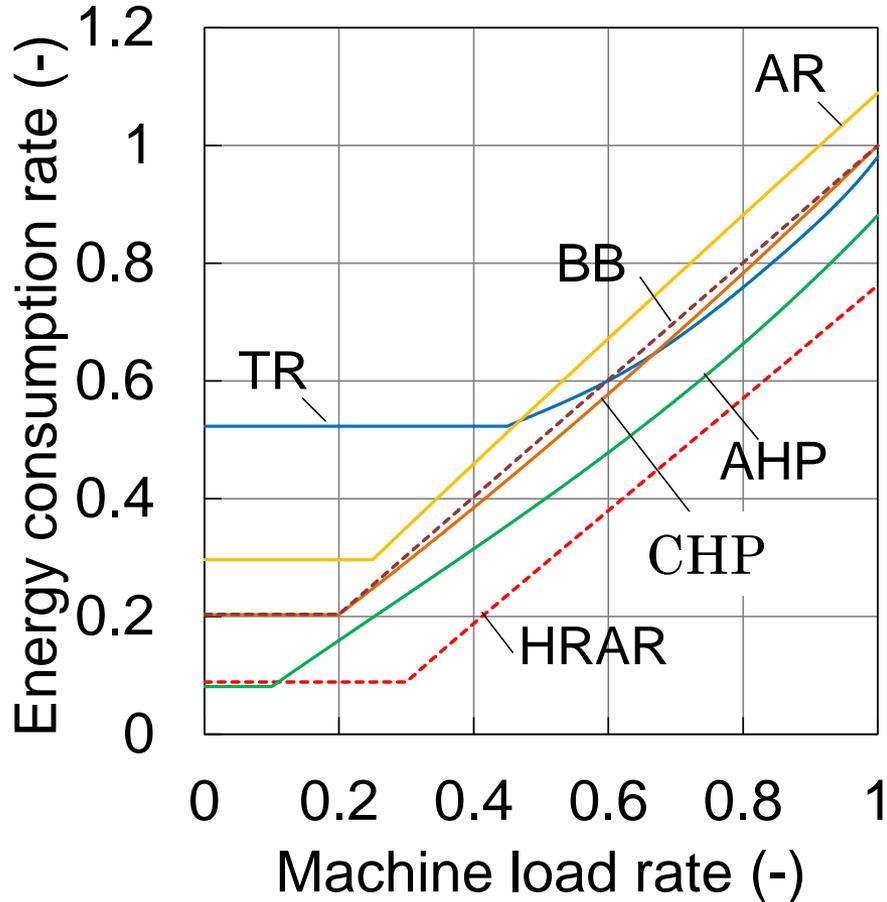
- Cooling demand (kW)
- Hot water demand (kW)
- Electric demand (kW)
- Price of purchased electricity (yen/kWh)

機器特性

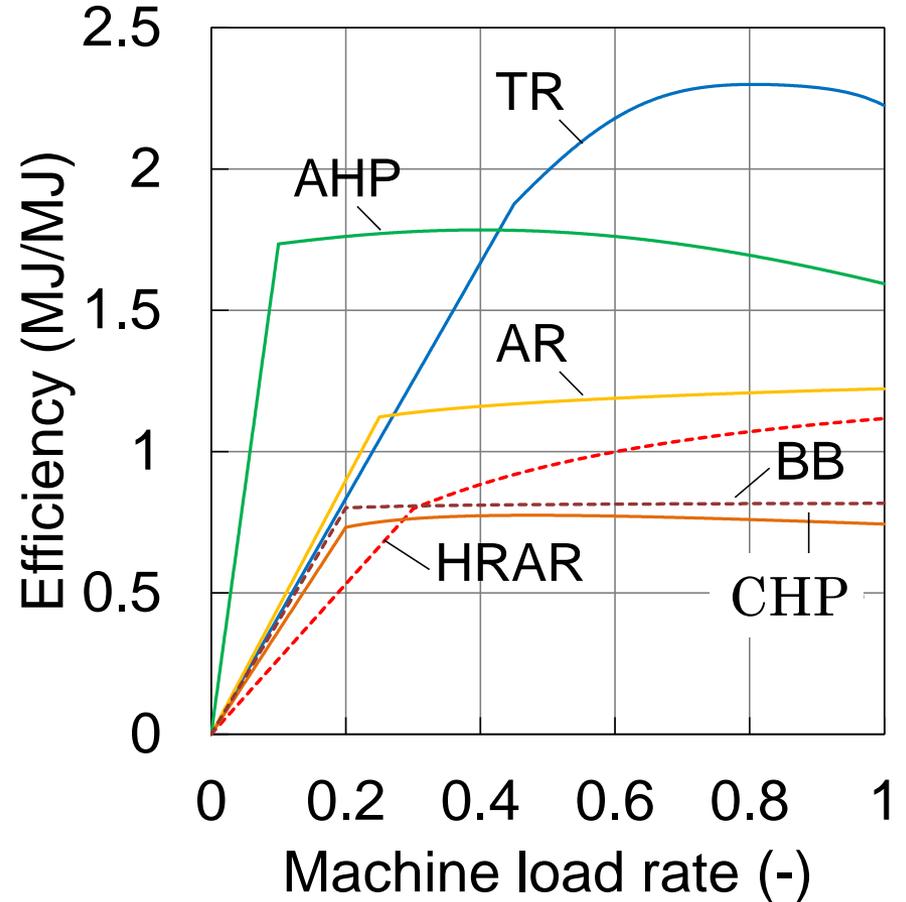
外氣乾球温度: 30°C
冷却水温度: 32°C

特性曲線

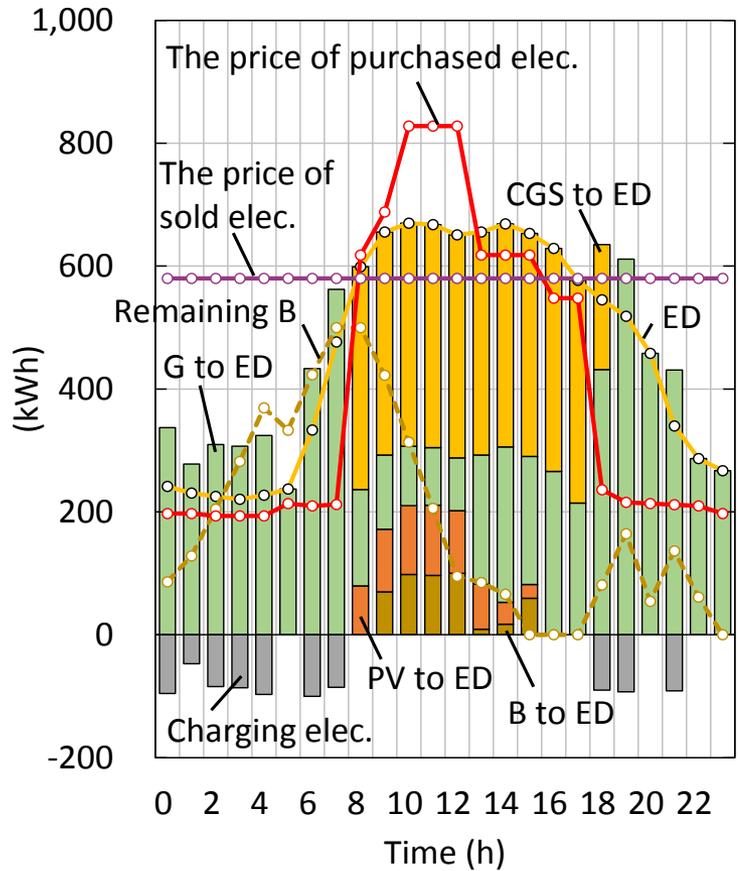
(部分負荷率 - 燃料消費率)



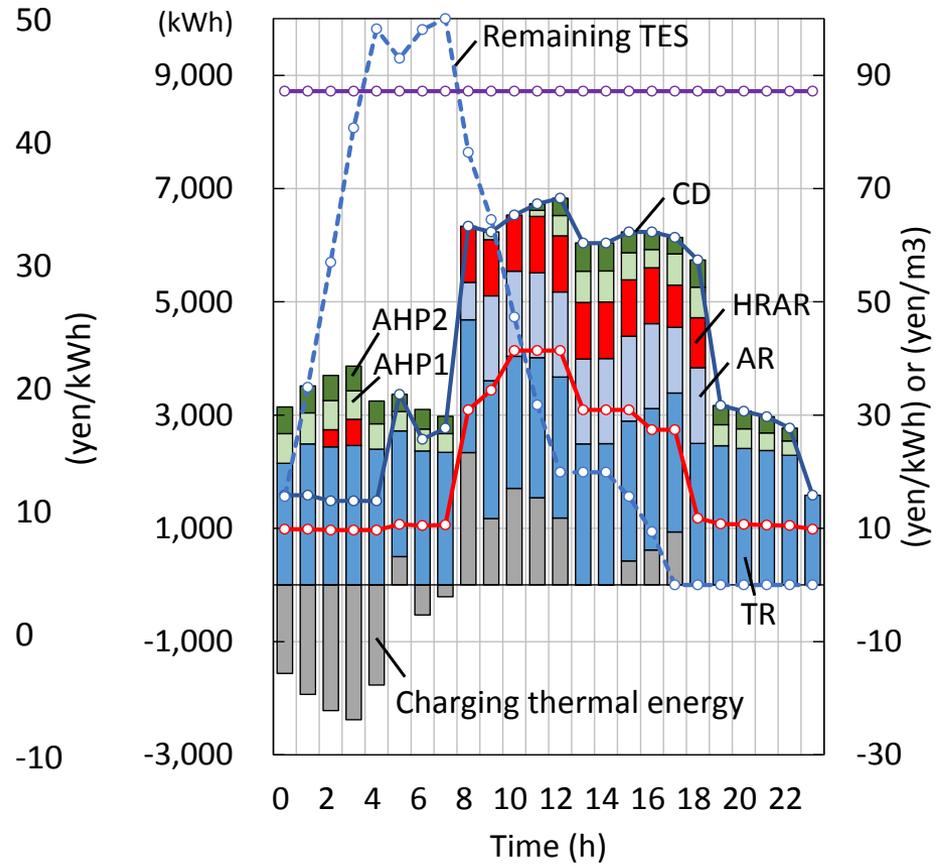
(部分負荷率 - 効率)



最適化結果①

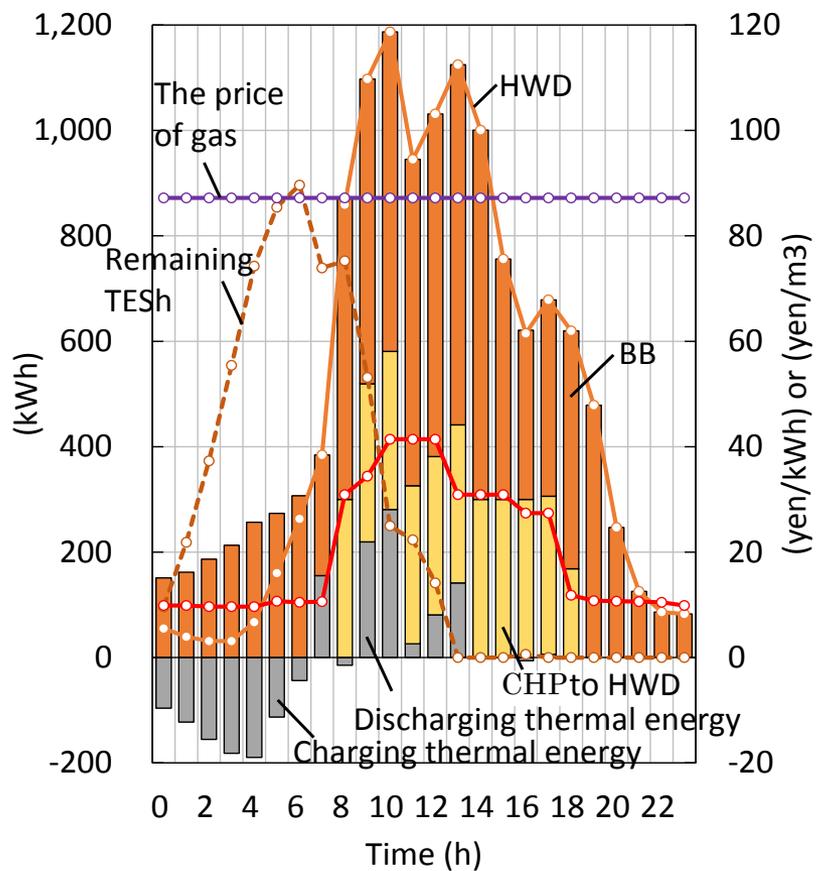


電力系統

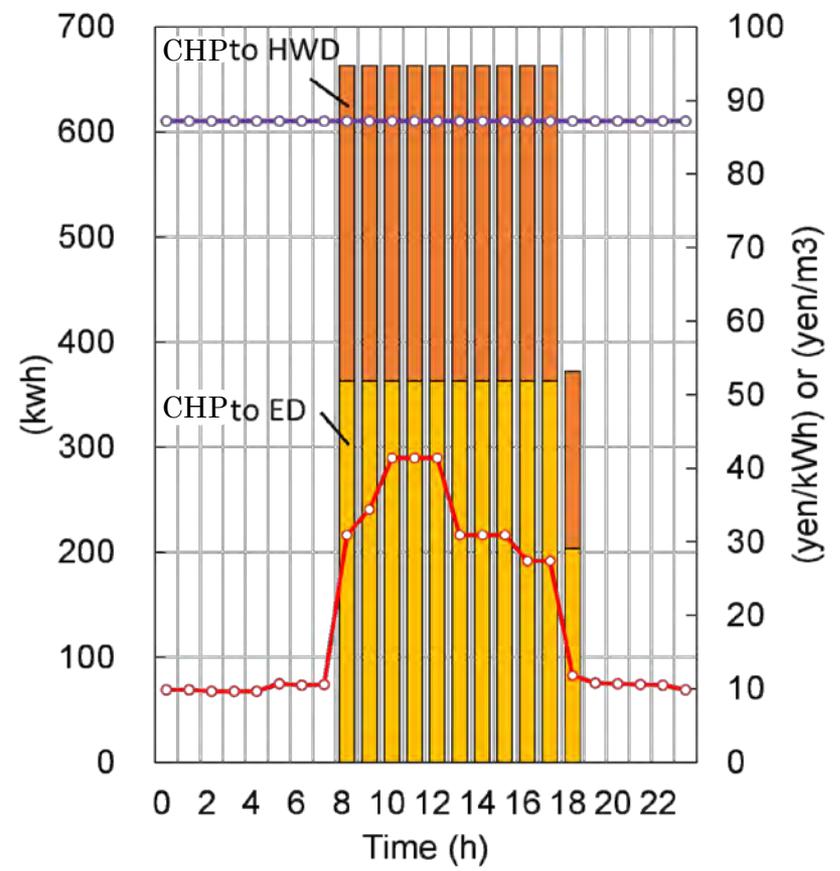


空調用冷熱系統

最適化結果②



給湯系統



CHP

確率・学習的探索で最適解が得られるのか？

- 「真の最適解」が得られる数学的な保証はない

解の精度を検討：線形計画法(CPLEX)との比較

(Cambridge Univ., R. Chaudhary lab.共同研究)

1. 冷却水温度及びCOP変化を考慮しない

	CPLEX (区分線形近似)		ϵ DE
目的関数 (1日の運用コスト)	705,293 yen	0.1%	706,013 yen
計算時間	16s	<	276s

2. 冷却水温度及びCOP変化を考慮 (CPLEXは組込めず)

	CPLEX (区分線形近似)		ϵ DE
目的関数 (1日の運用コスト)	705,293 yen	2.1%	686,527 yen
計算時間	16s	>	295s

ご清聴ありがとうございました

東京大学生産技術研究所
大岡龍三

ooka@iis.u-tokyo.ac.jp