

家庭用SOFC-CGSの性能評価に関する研究

その1 システム概要と数理モデル化

Study on Performance Evaluation of Residential SOFC Co-Generation Systems

Part 1 Outline of system and mathematical modeling



夜久 幸希(京都府立大学) 尾崎 明仁(京都府立大学)

研究背景および目的

地球環境問題

温室効果ガスによる地球温暖化
環境汚染ガスの排出
(NOx, Sox, ダイオキシン)

エネルギー問題

生活エネルギー消費量の増加
エネルギー供給体制の先行き不透明
化石資源の枯渇への懸念

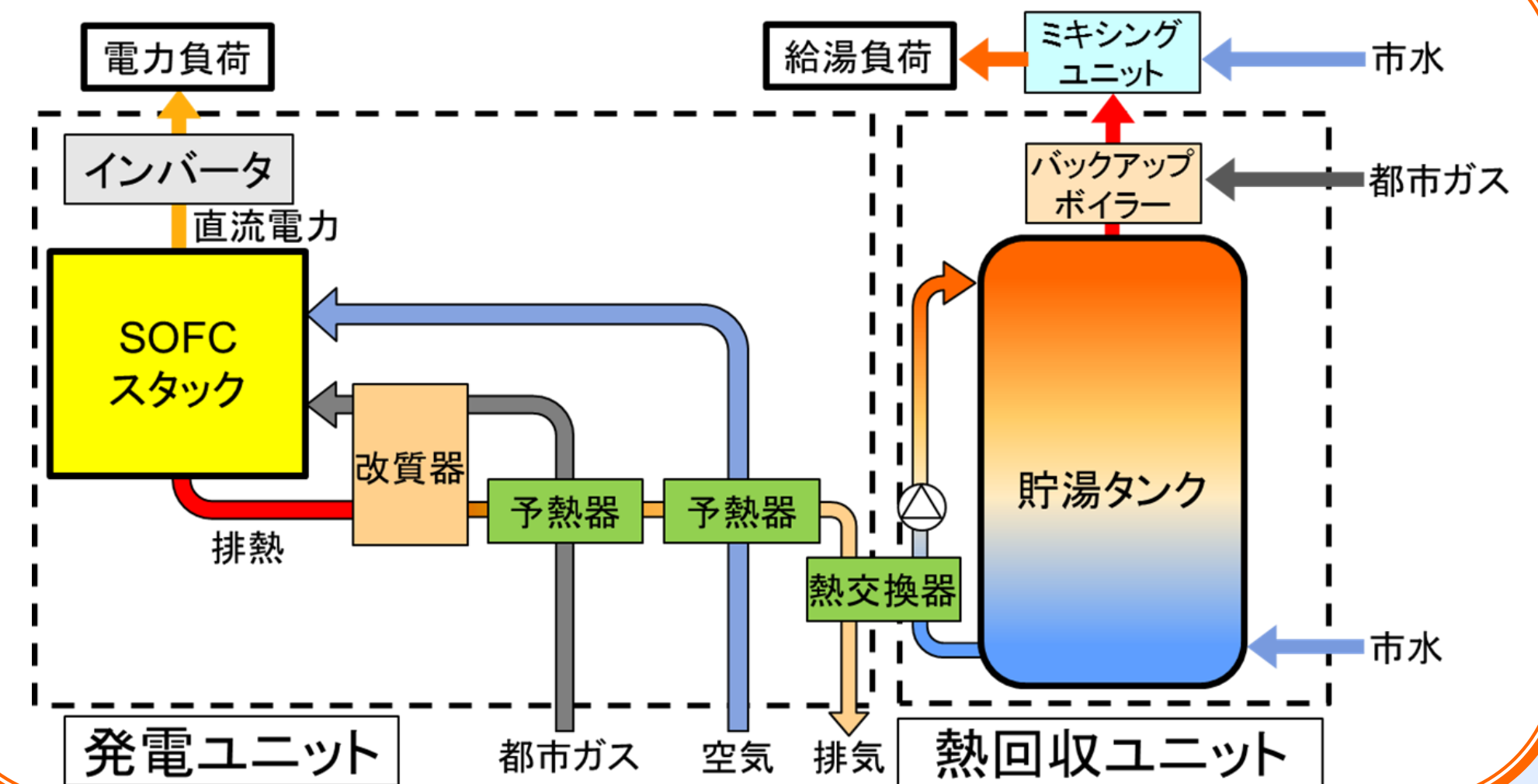
2011年10月より、固体酸化物形燃料電池を用いた家庭用燃料電池
コージェネレーションシステム(以下、SOFC-CGS)の商用化が開始
本研究では...

SOFC-CGSシミュレーションプログラムの構築

建築熱環境・熱負荷解析ソフト「THERB」

建物導入時の効果解析
省エネルギー効果
環境負荷削減

SOFC-CGSシステム概要



各構成機器の数理モデル

- SOFC -

★麦倉が提案する中温型SOFC(800℃)の性能表示式をベースに構築
前提条件

運転温度および各ガス分圧はSOFC出入口の平均値とする

$$\begin{aligned} \text{アノード側反応量} \quad N_{H_2} + N_{CO} &= \frac{i_c A}{2F} \\ \text{カソード側反応量} \quad N_{O_2} &= \frac{i_c A}{4F} \end{aligned}$$

$$\text{単セル理論起電力} : E = -\frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}$$

内部抵抗による
過電圧(電圧低下)

- ・電解質のイオン抵抗および部材の接触抵抗の過電圧
 $\eta_{ir} = 1.9 \times 10^{-8} \exp(-66 \times 10^3 / RT) \times i_c$
- ・アノード反応による過電圧
 $\eta_a = 3.0 \times 10^{-6} \times P_{H_2}^{-0.5} \times i_c$
- ・カソード反応による過電圧
 $\eta_c = 6.5 \times 10^{-6} \times P_{O_2}^{-0.5} \times i_c$
- ・ネルンストロス η_{NE}

$$\text{実質的なセル電圧} : V_{cell} = E - \eta_{ir} - \eta_a - \eta_c - \eta_{NE}$$

$$\text{DC発電端出力} : P_{dcp} = \{(V_{cell} \times N) \times (i_c \times A)\}$$

$$\text{AC送電端出力} : P_{act} = (P_{dcp} \times \eta_{inv}) - \varepsilon_{ae}$$

最終的に P_{act} がSOFC-CGSにおける正味の出力として、家庭の電力負荷に対応

入力条件: P_{act} (家庭の電力消費量) $\Rightarrow$ 電流および電圧の値を収束計算により算出

$$\text{DC発電端効率} \quad \eta_{dcp} = \frac{P_{dcp}(W) \times 3600}{\text{都市ガス消費量}(MJ \text{ HHV})} \times 100$$

$$\text{AC送電端効率} \quad \eta_{act} = \frac{P_{act}(W) \times 3600}{\text{都市ガス消費量}(MJ \text{ HHV})} \times 100$$

$$\text{熱回収効率} \quad \eta_{hw} = \frac{Q_{hw}(W) \times 3600}{\text{都市ガス消費量}(MJ \text{ HHV})} \times 100$$

都市ガス消費量について

燃料利用率 U_f (反応する燃料量/投入する燃料量)を与え、
発電反応量および改質反応量より都市ガス消費量を算出

- 改質器 -

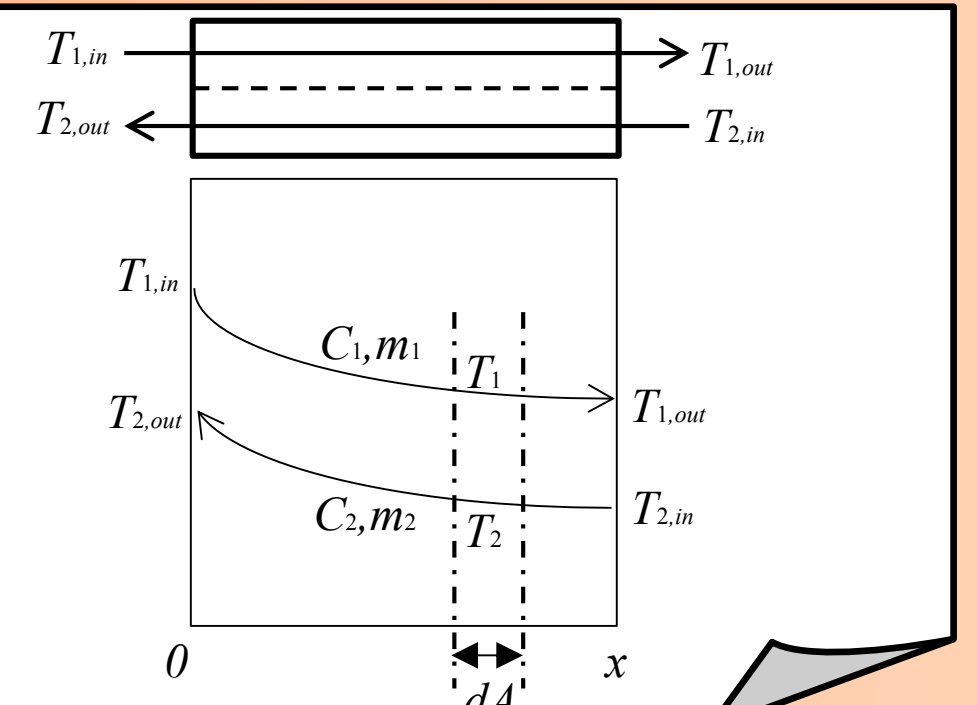
- ① 運転条件の設定 $\Rightarrow$ 改質温度・運転圧力・S/C比(水蒸気/炭素比)
 - ② 都市ガス+水蒸気の混合ガスを投入
 - ③ メタン以外の成分は先に改質された状態であると仮定
 - ④ 以下の改質、シフト両反応の化学平衡が同時に満足する反応量を計算
- $$\begin{aligned} CH_4 + H_2O &= CO + 3H_2 & \text{改質反応(吸熱)} & K_r = \exp\left(\frac{-\Delta G_r}{RT}\right) = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} \\ CO + H_2O &= CO_2 + H_2 & \text{シフト反応(発熱)} & K_s = \exp\left(\frac{-\Delta G_s}{RT}\right) = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} \end{aligned}$$

- 熱交換器 -

対数平均温度差の概念を適用

$$Q = \frac{(T_{1,in} - T_{2,out}) - (T_{1,out} - T_{2,in})}{\log\left(\frac{T_{1,in} - T_{2,out}}{T_{1,out} - T_{2,in}}\right)} U A_h$$
$$= m_1 c_1 (T_{1,in} - T_{1,out})$$
$$= m_2 c_2 (T_{2,out} - T_{2,in})$$

記号
 m : 質量流量(kg/s)
 C : 比熱(J/kg・K)
 T : 温度(℃)
 A : 伝熱面積(m²)
 U : 熱通過率(W/m²・K)



- 貯湯タンク -

$$\text{第1層} \quad c \cdot \gamma \cdot V \frac{dT}{dt} = c \cdot \gamma \cdot m_h (T_{in} - T_1) + c \cdot \gamma \cdot m_c (T_2 - T_1) + \frac{\lambda \cdot A_t}{dx} \cdot (T_2 - T_1) - Q_h$$

第2層～第n-1層($k=2,3,\dots,n-1$)

$$c \cdot \gamma \cdot V \frac{dT}{dt} = c \cdot \gamma \cdot m_h (T_{k-1} - T_k) + c \cdot \gamma \cdot m_c (T_{k+1} - T_k) + \frac{\lambda \cdot A_t}{dx} \cdot (T_{k-1} - 2T_k + T_{k+1}) - Q_h$$

第n層

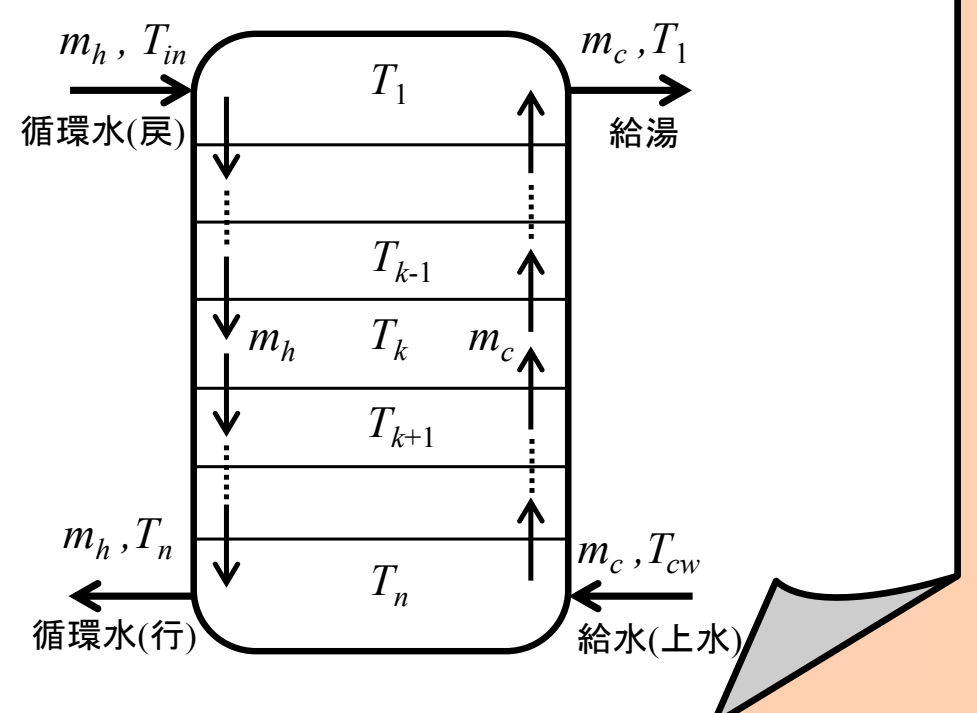
$$c \cdot \gamma \cdot V \frac{dT}{dt} = c \cdot \gamma \cdot m_c (T_{cn} - T_n) + c \cdot \gamma \cdot m_h (T_{n-1} - T_n) + \frac{\lambda \cdot A_t}{dx} \cdot (T_{n-1} - T_n) - Q_h$$

各層の熱損失($k=1,2,\dots,n$)

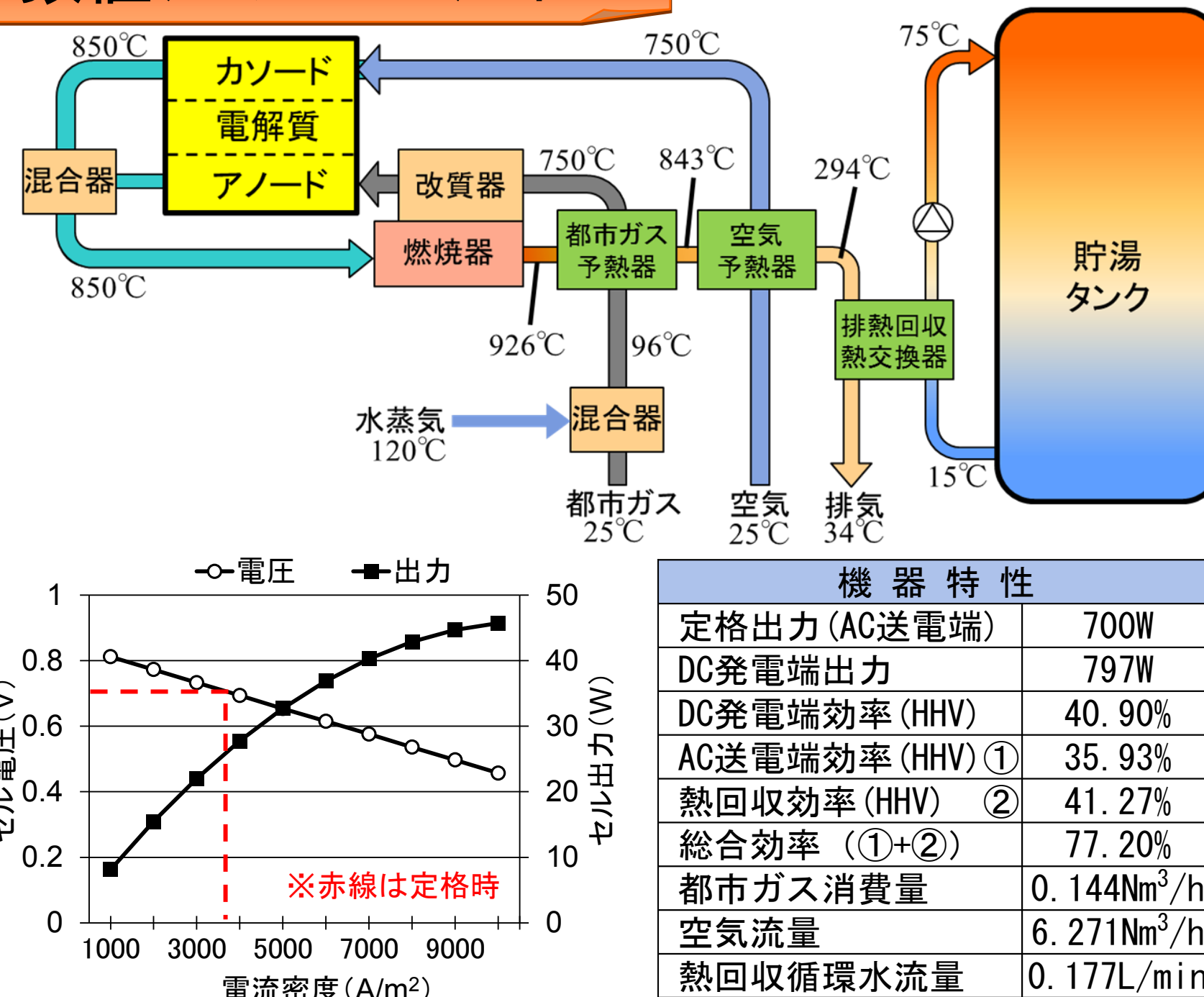
$$Q_h = K \cdot A_k \cdot (T_k - T_{air})$$

記号
 c : 水の比熱(J/kg・K)
 γ : 水の比重(kg/m³)
 λ : 水の伝導率(W/m・K)
 V : 各層の体積(m³)
 A_t : タンク水平面面積(m²)
 A_k : k層の側面面積(m²)
 dx : 各層の高さ(m)
 m : 流量(m³/s)
 T : 水温(℃)
 Q_h : 熱損失量(W/h)
 K : 貯湯槽熱貫流率(W/m²・K)
 dt : 微小時間(S)

添字
 n : 分割数
 k : 分割点
 cw : 市水
 air : 空気
 in : 循環水(戻)



数値シミュレーション



むすび

●AC送電端効率は約36%、熱回収効率は約41%、
総合効率で約77%となる結果が得られた。

$\Rightarrow$ 今回の計算では、改質に必要な水蒸気を予め与え、水
蒸気発生熱を考慮していない。排熱がその役割を担
うことを考慮すると、若干の熱回収効率低下が予想される。

●スタック発熱を抑えるため空気流量を調整した結
果、空気流量が過大となった。

$\Rightarrow$ 空気冷却のみでは空気ブロウの消費動力が大きくなるこ
とが懸念されるため、スタック発熱を直接、改質器熱源とし
て利用する等、出入口温度の設定条件等も含めて、システ
ム構成に検討の余地がある。

今後は実測データと比較した上で、更なるプログ
ラムの精度向上を図り、建物導入時の効果につ
いて検討していく予定である。