

高い熱輸送機能を有する
低温作動型 AMTEC 発電システムの
Na冷却型高速炉への適用検討
(研究報告書)

2005年8月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-Ken 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

高い熱輸送機能を有する低温作動型 AMTEC 発電システムの

Na 冷却型高速炉への適用検討

(研究報告書)

中桐 俊男^{*1)}、田中 耕太郎^{*1)}

要旨

ヒートパイプと同様の高い熱輸送機能を有する低温作動型 AMTEC 発電システムの Na 冷却型小型高速炉への適用検討を行った。高速炉の熱出力は 395MWt であり、AMTEC 発電セルはナトリウム蒸気供給タイプの小型セルであり、発電と同時に、一次 Na 冷却系の熱を水蒸気系へ伝える熱輸送機器としても用いるものである。

検討結果では、プラント全体の発電効率は最大で 49% となり、水蒸気タービン発電単独の場合に比べ、発電効率が有意に上昇することがわかった。

また、AMTEC の熱輸送能力を活用することにより、AMTEC 設置 (受熱) 面積は従来の中間熱交換器と同様の約 1,000m² 前後とできることもわかった。

今後は、高速炉の冷却材温度において高い発電効率と高い熱輸送能力が得られる AMTEC 発電セル製作の実現性評価、および、AMTEC 発電セルを組み込んだ熱交換機器の検討が必要である。

*1): 要素技術開発部 新材料研究グループ

Evaluation of generation and heat transfer performance of Low Temperature AMTEC for sodium cooled FBR plant

Toshio Nakagiri*¹⁾, Kotaro Tanaka*¹⁾

Abstract

Design study of AMTEC system for Sodium Cooled FBR was performed. Heat power of the FBR reactor is 395MWt, and the AMTEC system is used not only as electric power generator, but heat transfer device from primary coolant circuit to steam generation system. Evaluated maximum electricity generation efficiency was 49% which is increased about 9% higher than the case only steam generation system was used. Evaluated heat conduction area for AMTEC was about 1,000m².

In the future, high performance AMTEC cell should be manufactured and design study of heat transfer equipment which has AMTEC system should be performed.

*1): Advanced Material Research Group, Advanced Technology Division

目次

1. 緒言	1
2. 低温作動型 AMTEC の作動原理、特徴	2
2.1 原理・特徴	2
2.2 出力密度の解析方法	2
2.3 熱損失と熱電変換効率の評価方法	3
3. ナトリウムヒートパイプ	5
3.1 アルカリ金属パイプの原理・特徴	5
3.2 熱輸送限界の評価	5
4. Na 冷却型小型高速炉への AMTEC 発電システムの適用検討	7
4.1 液体金属冷却型炉と AMTEC の組合せに関する既存知見	7
4.2 低温作動型 AMTEC 発電セルの性能評価	9
4.3 小型炉への適用検討	9
4.4 課題の摘出	11
5. 結言	12
6. 謝辞	13
7. 参考文献	14

図表一覧

表一覧

表 1	音速限界評価条件	15
表 2	低温作動型 AMTEC 発電性能評価条件	15
表 3	低温作動型 AMTEC 性能評価結果 (最大効率、軸方向熱流速)	16
表 4	小型高速炉への AMTEC 適用検討条件	16

図一覧

図 1	AMTEC 発電原理	17
図 2	AMTEC の熱損失	18
図 3	ヒートパイプ概念	19
図 4	ヒートパイプ用熱輸送媒体使用温度域	20
図 5	ヒートパイプの熱輸送限界	21
図 6	低温作動型 AMTEC セルの音速限界評価結果	22
図 7	ループ型炉でエキスパンダーを持つアルカリ金属直接利用概念 (DC)	23
図 8	プール型炉でエキスパンダーを持つアルカリ金属間接利用概念 (IC)	24
図 9	プール型炉でボイラーを持つアルカリ金属間接利用概念 (IC)	25
図 10	小型 AMTEC 発電セル概念	26
図 11	小型素子最適配置計算結果	27
図 12	電流密度と出力、発電効率の関係	28
図 13	小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果 (AMTEC-HX 併用 : AMTEC 効率最大ケース)	29
図 14	小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果 (AMTEC-HX 併用 : 熱流速最大ケース)	30
図 15	小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果 (AMTEC 単独 : AMTEC 効率最大ケース)	31
図 16	小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果 (AMTEC 単独 : 熱流速最大ケース)	32

付録-1

付録-1 AMTEC 発電性能評価プログラム出力リスト……………付-1(1)

1. 緒言

アルカリ金属熱電変換 (AMTEC : Alkali Metal Thermo-Electric Conversion) は、 β'' (ダブルプライムベータ) アルミナ固体電解質のアルカリ金属イオン (Na^+ 、 K^+ 等) 伝導性を利用した直接発電方式であり、熱再生型濃淡電池の一種である。現在、主に宇宙用としての開発が進んでおり、ナトリウム (Na) を作動流体とした円筒型セルにおいて、熱電変換効率は 10~15%程度 (温度条件 1200K-600K) が達成されている[1]。

Na を作動流体とした約 900K までの低温作動型 AMTEC では、通常の AMTEC の作動温度 (1100K~1300K) と比較すると電極面積あたりの出力密度は低下するが、電極・構造材料の耐久性ならびに高温側の熱交換特性の点で有利である。このため、低温作動型 AMTEC はより現実的な方式といえる[1]。また、直径 3mm 以下の小型発電素子を多数本配列し、受熱面積あたりの電極面積を増加させるとともに、低温で高性能が期待できるモリブデン電極および熱損失低減策の採用により、約 900K 以下でも 10%を越える熱電変換効率が期待できる[2]。

本報告では、平成 14 年度から 3 年間にわたり実施された先行基礎工学研究協力の一環として、ナトリウムヒートパイプと同様の熱輸送機能を併せ持つ蒸気供給方式の低温作動型 AMTEC 発電セルの発電性能および熱輸送性能について概略評価を行うとともに、ナトリウム冷却型小型高速炉の一次系への適用検討を行った結果をまとめた。

2. 低温作動型 AMTEC の作動原理、特徴

2.1 原理、特徴[2]

AMTEC は図 1 に示すように、高温側と低温側の Na の温度差に対応するギブスエネルギー差を利用して発電する方式である。ここで固体電解質（以下、BASE）は高温側の等温場に位置するため、BASE 材料を通しての熱伝導損失は避けることができる。BASE 右側カソード多孔質膜電極において Na は気相となり、低温側に向かう。AMTEC の主な熱損失は、このカソード側多孔質電極における分極抵抗と集電抵抗、Na 蒸気移動に関する圧力損失に起因する。

低温側で凝縮した Na は、ウィックまたは電磁ポンプにより高温側に戻される。圧力差は、例えば高温側 1100K、低温側 500K とすると約 60kPa である。ここで電磁ポンプ使用方式は、熱伝導損失の低減は可能であるが、小型セル化に難点がある。一方、ウィック使用方式は、構造が簡素で小型セル化に適している特徴があり、現在主に研究されている。問題は、ウィック材を通しての熱伝導損失が入力熱量の 10～20%となる点にある。

高温側に戻された Na を BASE アノード側に供給する方式としては、液供給方式と蒸気供給方式がある。液供給方式は、発電時の Na 蒸発潜熱を BASE 部に供給する方式であり、蒸気供給型は Na 蒸発部をウィック高温側などの別位置とする方式である。後者はアノード側電極が必要であり、またその蒸気供給の圧力損失を考慮に入れる必要を生じるが、ヒートパイプを高温側の熱交換に使用すると同様の効果が得られ、外部からの熱供給に対応した構造が可能となる点で構造的に有利である。

2.2 出力密度の解析方法[3]

AMTEC の固体電解質と電極の界面における反応は、電荷移動速度が律速条件と考えられ、電流密度は Butler-Volmer の式から以下の式で与えられる。

$$i = i_0 \left(e^{-\alpha \eta_c f} - \frac{\Delta p_e + \Delta p_{pe} + p_1}{p_1} e^{(1-\alpha) \eta_c f} \right) \quad (1)$$

$$\Delta p_e = (2\pi MR_0 T_2)^{1/2} J / F \quad (2)$$

$$\Delta p_{pe} = 0.75G(MR_0 T_2 / 2\pi)^{0.5} i / F \quad (3)$$

$$i_0 = B(p_2 p_1 / T_2)^{0.5} \quad (4)$$

$$\eta_c = E_0 - i(r_b + r) \quad (5)$$

$$r_b = i \cdot 100 \cdot T_2 \cdot (A_1 \exp(A_2/T_2) + A_3 \exp(A_4/T_2)) \quad (6)$$

$$(A_1=4.03 \times 10^{-4}, A_2=1420, A_3=3.24 \times 10^{-7}, A_4=4725)$$

ここで、 i_0 は交換電流密度、 α は移動係数、 Δp_e 、 Δp_{pe} は電極における蒸発、流れの圧力損失項である。移動係数 α は電極イオン化反応において活性化エネルギー変化に関係する無次元係数であり、Williams らの知見[3]から本検討では 0.5 とした。また、 ΔPe は、クヌッセン数が 10 以上であることから自由分子流の式より計算した。M は分子量、 R_0 は一般ガス定数、F はファラデー定数、 η_c は分極電位、 r_b は BASE 抵抗、 $f = F/R_0 T_2$ である。また、G は電極膜に細い円柱状の穴が多数あいていると仮定した形状パラメータで、穴の直径を d、長さを l、面積あたりの個数 N より次のように定義される。

$$G = 8l/(d^3 N) \quad (7)$$

本検討では、マグネトロンスパッタにより作成した Mo 電極の約 900K における性能評価実験結果から、 $G=20$ とした。

AMTEC の電気出力は、(1)式の電流値と(5)式の方極電位から、次式により算出される。

$$W = i \cdot \eta_c \quad (8)$$

2.3 熱損失と熱電変換効率の評価方法

発電セルの熱電変換効率は、図 2 に示す熱損失を考慮した次式により求まる。

$$\eta = \frac{P}{P + Q_e + Q_s + Q_{12}} \quad (9)$$

ここで、P は電気出力、 Q_e は電極部からの Na 蒸発潜熱、 Q_s は Na 液加熱のための顕熱、 Q_{12} は容器側壁と毛細管内部の伝導熱損失項である。 Q_e と Q_s は Na の移動量、すなわち出力電流値に比例する損失項であり、Vargaftik[4]のデータをフィッティングした求めた次式により算出した。

$$Q_e = (iM/F) \cdot (((B_5 \cdot T_c + B_4) \cdot T_c + B_3) \cdot T_c + B_2) \cdot T_c + B_1) \cdot 1000 \quad (10)$$

$$(B_1=4536.65, B_2=0.115574, B_3=-2.00342 \times 10^{-2}, B_4=1.49893 \times 10^{-6},$$

$$B_5 = -3.75315 \times 10^{-10}$$

$$Q_s = (iM/F) * (((C_5 * T_c + C_4) * T_c + C_3) * T_c + C_2) * T_c + C_1 \quad (11)$$

$$(C_1 = -362.379, C_2 = 1.74337, C_3 = -6.45934 \times 10^{-4}, C_4 = 3.50461 \times 10^{-7},$$

$$C_5 = -6.04716 \times 10^{-11})$$

ここで T_c はナトリウム温度(K)である。

また、 Q_{12} は AMTEC の高温側と低温側の温度差に比例し、また、長尺化により熱損失が減少すると仮定し、以下の式により算出した。

$$Q_{12} = K * (T_2 - T_1) \quad (12)$$

(K : 熱損失に関する係数、後述の表 3 に示す値)

2.2 項の出力および 2.3 項の発電効率を同時に計算するプログラムリストを付録-1 に添付する。

3. ナトリウムヒートパイプ

3.1 アルカリ金属ヒートパイプの原理・特徴[5]

アルカリ金属は沸点が高く、蒸発熱が大きいことから、熱輸送用のヒートパイプとして利用される。ヒートパイプは中空の閉じたステンレス鋼または高温用合金性のチューブであり、単一のナトリウム、カリウム、リチウム等のアルカリ金属を封入してある。チューブの一端は外部熱源により加熱され、アルカリ金属は蒸発して蒸気になる。蒸気は他端にエネルギーを輸送し、ヒートシンクにより凝縮して液体に戻る(図3参照)。凝縮した液体ナトリウムはチューブ壁内の細い流路を通して、毛細管現象により、蒸気の流れと逆方向に高温側に戻される。カリウム、ナトリウムおよびリチウムは広い温度域でヒートパイプとして利用可能である。図4にアルカリ金属が熱輸送媒体として利用される際の温度域を他の液体と共に示す。また、ヒートパイプは大量の熱を輸送する能力があるだけでなく、温度勾配が小さい場合にも熱輸送が可能である。

3.2 熱輸送限界の評価

ヒートパイプの熱輸送性能の上限値を決定するものとして、図5(文献[5]から引用)に示すような以下の4つの熱輸送限界が存在する[5-7]。

- (1) ウィック限界：毛細管限界とも言う。ウィック中の液流に関する限界値
- (2) 飛散限界：エントレインメント限界とも言う。蒸発面での液流と蒸気流の相対速度に基づく限界値である。
- (3) 沸騰限界：蒸発部のウィック中での相変化(気泡発生)による限界値である。
- (4) 音速限界：蒸気流の移動速度の限界値である。

通常、図5に示したように、熱輸送限界に関するメカニズムのうち、最も低い限界値を与えると考えられるのは(4)の音速限界である。また、(1)~(3)はウィックが存在することにより生じる限界であり、ウィックの有無、ウィック径および蒸発面の構造・面積等により大きく変化する。このため、ここでは、ヒートパイプとしての熱輸送能力の上限値の評価を目的として、音速限界のみを(13)式を用いて([7])評価した。計算に用いた数値を表1に、音速限界の評価結果を図6に示す。

$$Q = A_v \rho_v L \sqrt{\frac{\gamma R T_v}{2(1+\gamma)}} \quad (13)$$

ここで、 Q ：熱輸送量、 A_v ：蒸気流路の断面積(m^2)、 ρ_v ：蒸気密度(kg/m^3)、 L ：潜熱(J/kg)、 γ ：比熱比 (=5/3=1.67)、 T_v ：蒸気温度(K)である。

4. Na 冷却小型高速炉への AMTEC 発電システムの適用検討

ここでは、実用化戦略調査研究において水素製造用に検討されている熱出力 395MWt のナトリウム冷却小型高速炉を選定し、発電と熱輸送を同時に行う小型 AMTEC 発電セルの適用検討を行った。

4.1 液体金属冷却型炉 (LMR : Liquid Metal Cooled Reactor) と AMTEC の組合せに関する既存知見[8]

LMR と AMTEC を組合せた概念の検討は、開発途上国や僻地への電力供給を目的とした研究が行われてきた。LMR と AMTEC の接続方法は図 7 のような炉心冷却用の液体金属 (ナトリウム、カリウム) を AMTEC システムで直接利用するタイプ (DC、direct coupling) と、図 8 および図 9 のような炉心冷却用とは別に AMTEC 用の系統を設けるタイプ (IC、Indirect Coupling) がある。以下にそれぞれのタイプの特徴を述べる。

(1) ループ型炉でエキスパンダーを持つ直接利用タイプ (DC)

図 7 に示すように、このタイプでは LMR と AMTEC ユニットの同じ作動流体を用い、アルカリ金属蒸気はエキスパンダー内でノズルからフラッシュ蒸発により生成される。AMTEC と炉心ポンプは炉容器の外に設置される。

DC は中間熱交換器 (Heat Exchanger : HX) を削除可能であるため、非常に簡素な構成となるが、プラントの運転と保守が煩雑になり、AMTEC 作動流体を兼ねる一次冷却材に対する遮蔽の問題と AMTEC ユニット中に一次冷却材中の活性物質が入ることによる材料腐食の問題が生じる。さらに、AMTEC に供給する冷却材温度をできるだけ高くする必要があるので AMTEC ユニットは格納容器内に設置する必要があり、格納容器のサイズが大きくなる。

(2) プール型炉でエキスパンダーを持つ間接利用タイプ (IC)

図 8 に示すように、この概念では原子炉と AMTEC は HX で接続される。アルカリ金属蒸気はエキスパンダーにより生成され、HX と一次系ポンプは炉容器内に設置される (プール型炉)。

IC にはいくつかの利点がある。第 1 に、放射性物質を一次系に閉じ込められ、AMTEC ユニットと二次系は格納容器外に設置されるため、遮蔽が不要である。アルカリ金属の熱交換器は非常にコンパクトであるため、遮蔽と格納容器サイズの削減により資本コス

トの増加を抑えられる可能性がある。また、ICはAMTECユニットとの接続および保守においてDCよりもフレキシビリティを持っており、最良の核特性と熱電変換性能を得られるように一次系と二次系で別々の作動流体を選定することが可能となる。最後に、腐食生成物はそれぞれのループに閉じ込められるので、ICは材料選定にもよりフレキシビリティを与えることができる。LMR-AMTECは作動温度が高く、高価な合金の使用が要求されるため、これは重要な特性である。

プール型炉原子炉は、冷却材のインベントリを増加させガードベッセルを用いる設計により、大規模な冷却材喪失事故（Loss Of Coolant Accident：LOCA）が排除でき、安全性が改善する。さらに、HXがコンパクトになることが期待できるため、炉容器内に設置できる可能性がある。

(3) プール型炉でボイラーを持つ間接利用タイプ（IC）

(2)におけるHXをアルカリ金属ボイラー（Alkali Metal Boiler：AMB）で置き換えたタイプであり、図9にその概念を示す。ICとプール型炉の長所に加え、エキスパンダーを使用しないことによる機器数の削減と腐食特性の改善が可能となる。しかし、AMBは次の二つの主要な欠点を持つ。

一つはアルカリ金属が配管表面をぬらし、沸騰の開始に必要な気泡の発生が困難となることである（Fraas, 1982）。このため、気泡が生成されるため前には、数百度の過熱が必要である。過熱後に沸騰が起ると、液体金属のエネルギーは爆発的な沸騰により非常に急速に放出される。この問題を解決するため、「ホットフィンガー」（MacPherson, 1967）のような機器、超音波（Yarosh, 1967）および不活性ガス微小気泡（Frass, 1982）による蒸発サイトを増加させるための方法が検討されてきた。

AMBの二つ目の欠点はアルカリ金属の飽和蒸気圧が低いことであり、2相領域で極端な温度低下が起きないように圧力損失を非常に低く保持する必要があることである。この問題はボイラーの流動断面積を増やすか、カリウムやセシウムなどの飽和蒸気圧の高いアルカリ金属を使用することで解決可能である。

上記の(1)～(3)の知見から、LMRへ適用するAMTECシステムとしては、遮蔽、材料腐食、運転・保守の問題の少ない間接利用タイプ（IC）で、機器数を削減可能なアルカリ金属ボイラータイプの利点が多いことがわかる。

今回のナトリウム冷却型小型高速炉への適用検討においては、上記の知見を踏まえ、

一次冷却系とは異なる作動流体を持つセルタイプの小型 AMTEC で、発電素子表面でナトリウムの蒸発が起こる蒸気供給タイプを対象とする。

4.2 低温作動型 AMTEC 発電セルの性能評価

図 10 に示すような内径 3cm のステンレス容器内に発電素子を多数本配置した蒸気供給型のウィックタイプ発電セルの発電性能および熱輸送性能について評価した。1つの容器内の素子本数は、図 11 に示す素子最適配置計算結果を基に、 $\phi 3\text{mm}$ の素子の場合には 37 本、 $\phi 1\text{mm}$ の場合には 207 本とした。

表 2 に計算条件をまとめて示す。高温側温度は一次冷却系 Na 温度から 500°C 、低温側温度は水蒸気系温度から 250°C とした。表に示すように発電素子の径および長さを変化させた 3 ケースについて計算した。計算に必要な係数はカソード電極の形状係数 $G=20$ 、交換電流密度 $B=1000 (\text{AK}^{0.5}/\text{m}^2\text{Pa})$ 、集電抵抗 $r_c=0.1 (\Omega/\text{cm}^2)$ 、移動係数 $\alpha=0.5$ とした。また、発電装置に関する総熱損失量 ($Q_{12}=K_{12} \cdot (T_2-T_1)$: K_{12} は表 3 中に示す定数) は、発電素子の長尺化、細径化に従って低下するものと仮定した。

表 3 に各ケースにおける最大効率とその場合の軸方向熱流速の計算結果を示す。長尺化に伴って熱損失が低減した Case-2 では、熱損失が大きい Case-1 に比べ発電効率、軸方向熱流速ともに大きくなっている。また、発電セルあたりの発電素子本数が多く、電極面積が大きい Case-3 では、軸方向熱流速は最も大きい、発電効率は Case-2 に比べやや低くなっている。

また、図 12 に Case-3 で取り出す電流密度を変化させた場合の発電セルの出力と効率を示す。図からわかるように、電流密度の増加に伴い出力、発電効率ともにピークをもち、2つのピークが現れる電流密度は一致しない。

4.3 小型高速炉への適用検討

実用化戦略調査研究において水素製造用に検討されている熱出力 395MWt のナトリウム冷却小型高速炉を選定し、一次冷却系へ 2.項で検討した Case-3 ($\phi 1\text{mm}$ 、L90mm の BASE を使用) の低温作動型 AMTEC 発電セルを適用した場合のプラント発電効率、AMTEC セル設置面積およびセル体積の検討を行った。水蒸気系タービンの発電効率は一律 38% とした。また、1 次ナトリウム系のホットレグ温度は一律 500°C 、水蒸気タービンへ供給する水蒸気温度も一律 400°C とし、1 次ナトリウム系のコールドレグ温度および水蒸気系の AMTEC システムへの供給温度は熱バランスを考慮して、対数平均温度差を

基に算出した。各ケースの計算条件は合わせて表4に示す。

4.3.1 AMTEC-HX 併用のケース

図13に示すように一次系の熱の約2/3をAMTECセルに供給して発電し、AMTECセル低温側排熱は水蒸気系へと供給される。また、一次系の残りの約1/3は中間熱交換器を介して水蒸気系へ供給される。

(1) AMTEC 発電効率最大ケース

図13に示すように、AMTECの発電効率が最大（発電効率19.7%、軸方向熱流速 $10.8\text{W}/\text{cm}^2$ ）の場合には、プラント全体の発電効率は45.9%まで上昇（+7.9%）するが、軸方向熱流速が小さいため、AMTEC設置（受熱）面積は 2350m^2 、AMTECセルの個数も 3.32×10^6 個となった。このAMTEC設置面積は小型炉の中間熱媒体型蒸気発生器の伝熱面積[8]の約 1000m^2 の約2倍となり、格納容器内への設置も考慮すると、軸方向熱流速を増加させ、設置面積のコンパクト化が必要である。

(2) 熱流速最大ケース

(1)項の検討結果を踏まえ、Case-3の発電セルの運転条件を変更し、図14に示すように熱流速を $33.8\text{W}/\text{cm}^2$ まで増加させたケースについて検討した。この場合、発電セルの効率は10.1%まで低下する。プラント全体の発電効率は42%となり、4%の上昇に留まるが、設置面積は 755m^2 、発電セル設置個数は 1.07×10^6 個とどちらも上記ケースの約1/3となった。

4.3.2 AMTEC 単独ケース

このケースでは原子炉で発生する熱をすべてAMTECに供給すると仮定した。AMTECの高温側温度を 500°C とするため、一次系のコールドレグ温度を 450°C とし、また、蒸気タービン系に供給する蒸気温度を 400°C とするため、AMTECの低温側温度を 305°C とした。このような冷却材温度とした場合のプラント成立性については別途検討する必要がある。

(1) AMTEC 発電効率最大ケース

図15に示すように、AMTECの低温側温度が上昇したため、AMTEC発電効率は

17.8%に低下した。プラント全体の発電効率は49%まで上昇(+11%)するが、軸方向熱流速が $9.3\text{W}/\text{cm}^2$ と小さいため、AMTEC設置(受熱)面積は 4250m^2 、AMTECセルの個数も 6.0×10^6 個となった。このAMTEC設置面積は小型炉の中間熱媒体型蒸気発生器の伝熱面積[9]の約 1000m^2 の約4倍となり、格納容器内への設置は不可能であると考えられる。

(2) 熱流速最大ケース

図16に示すように発電セルの効率は10.9%、軸方向熱流速は $29.1\text{W}/\text{cm}^2$ 、プラント全体の総発電量は 176.7MWe 、発電効率は44.7%となり、水蒸気タービン単独場合の38%に対し、6.7%の上昇となった。設置面積は 1360m^2 、発電セル設置個数は 1.92×10^6 個となった。

4.4 課題の抽出

4.4.1 AMTEC 発電セルの製作可能性について

今回の検討では、直径3cmの円筒容器に β ”アルミナ発電素子を207本詰め込んだ蒸気供給タイプのAMTEC発電セルを想定した性能評価、小型FBRプラントへの適用検討を行った。このようなAMTEC発電セルについては、現状では机上検討の段階であり、実際に製作されておらず、電気出力、発電効率、熱損失等は実測されていない。このため、実際に発電セルを製作し、高温側約 500°C 、低温側約 250°C の温度条件で今回の検討と同程度の発電量、熱輸送量が達成可能であるかどうかについて確認を行う必要がある。

4.4.2 熱交換と発電を同時に行う機器の物量検討

4.3.1項および4.3.2項の評価結果より、AMTECセルの熱輸送量を約 $34\text{W}/\text{cm}^2$ まで高めたケース(熱流速最大ケース)でも、AMTECセルの受熱面積は $755 \sim 1360\text{m}^2$ 、AMTECセル個数は $1.07 \sim 1.92 \times 10^6$ 個となる。Case-3のAMTEC発電セルのサイズを直径3cm、長さ20cm(β ”アルミナ発電素子の約2倍の長さ)と仮定するとその占有体積は $151 \sim 271\text{m}^3$ となる。このAMTECを組み込んだ熱交換機器の占有体積が、実用化戦略調査研究[8]で検討されてきたHX-SG一体化機器(外径5m×高さ25m程度、占有体積 490m^3 程度)程度とできるかどうかについては別途検討を行う必要がある。

また、AMTECセルを上記の機器に組み込んだ際に、要求される発電量、熱交換量が得られるかどうかについても検討を行う必要がある。

5. 結言

ナトリウムヒートパイプを兼ねた低温作動型 AMTEC 発電セルの検討を行い、Na 冷却小型高速炉への適用検討を実施した。

- (1) 多数個の小型 AMTEC セルを一次冷却系に設置し、水蒸気系との熱交換にも併用することで、プラント全体の発電量・発電効率は有意に向上する。
- (2) 今回検討の対象とした低温作動型の AMTEC 発電セルについては、実際に製作して、その発電性能および熱輸送性能を確認する必要がある。
- (3) 小型 AMTEC 発電セルを組み込んだ発電・熱輸送機器について、その物量・プランと内でのレイアウト検討を行う必要がある。

6. 謝辞

ナトリウム冷却型小型高速炉への適用検討にあたり、プラントデータの提供および課題抽出に対してご協力頂いた FBR システム技術開発部 FBR システムグループの近澤佳隆副主任研究員に感謝します。また、適用検討に関して参考文献の提供・議論をして頂いた要素技術開発部新材料研究グループ客員研究員の本多武夫氏および藤井孝博博士に感謝します。

7. 参考文献

- 1) 田中耕太郎、藤井孝博、本多武夫、「低温作動型 AMTEC セルの熱設計」、熱電変換シンポ (TEC2001)
- 2) 田中耕太郎、中桐俊男、藤井孝博、本多武夫、「小型化 AMTEC セルの性能解析」、日本機械学会熱工学コンファレンス 2004 講演論文集、No.04-28、2004.
- 3) 田中耕太郎、根岸明、本多武夫、藤井孝博、増田俊久、野崎健、「アルカリ金属熱電変換の研究」、電子技術総合研究所研究報告 第 9 7 3 号、1995 年 3 月.
- 4) N. B. Vargaftik, " Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases, In Normal and Dissociated States, Second Edition", Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- 5) Hans U. Borgstedt and Cherian K. Mathews, " Applied Chemistry of the Alkali Metals", Plenum Press, 1987.
- 6) 小貫修、鈴木道明、水上浩、中本香一郎、「ファインセラミックス等の FBR への利用調査研究」、PNC ZN9410 86-058、1986 年 5 月.
- 7) 本機械学会、「伝熱ハンドブック」、丸善、1993 年 2 月.
- 8) Pablo R. Rubiolo, "Design options for a Liquid Metal Reactor coupled with an AMTEC unit", Proc. of IECEC 2002 paper No.20062, 2002.
- 9) 近澤佳隆、堀徹、此村守、塩谷洋樹、小野清、「Na 小型炉のシステム設計研究 一平成 13 年度の研究成果のまとめ一」、JNC TN9400 2002-055、

表 1 音速限界評価条件および評価結果

AMTEC セルデータ	セル底面直径 (mm)	30
	発電素子直径 (mm)	1.0
	発電素子本数 (本)	207
	r_{DC} (—)	0.23
	蒸気通路断面積 (m ²)	5.44E-4
ナトリウム物性値	蒸気密度 (kg/m ³)	3.78E-4
	蒸発潜熱 (J/kg)	4.09E+6
	比熱比(—)	1.667
500°Cにおけるナトリウムの音速限界 (W/cm ²)		35.15

表 2 低温作動型 AMTEC 発電性能評価条件

項目	数値	備考
運転温度 高温側 (°C) 低温側 (°C)	500 250	
交換電流密度係数 (B) (AK ^{0.5} /m ² Pa)	1000	実験値
電極内物質移動に関する 形状係数 (G) (—)	20	Mo 電極性能実験値
r_c (Ω/cm ²)	0.1	現状性能

表3 低温作動型 AMTEC 性能評価結果 (最大効率、軸方向熱流速)

	Case-1	Case-2	Case-3
素子 (電極部) サイズ	φ 3mm L30mm t=1mm (現状製作)	φ 3mm L150mm t=1mm	φ 1mm L90mm t=0.3mm
素子数	37	37	207
軸方向 熱流速 (W/cm ²)	6.93 (K ₁₂ =10)	12.8 (K ₁₂ =2)	10.8 (K ₁₂ =1)
出力 (We)	4.2	14.8	15.1
発電効率 (%)	8.5	16.3	19.7

表4 小型高速炉への AMTEC 適用検討条件

計算 ケース	各系統への供給熱量 (MWt)			各部温度 (°C)			発電システム効率 (%)	
	AMTEC	HX	蒸気 タービン	AMTEC (上:高温側 下:低温側)	HX (上:高温側 下:低温側)	蒸気 タービン (上:高温側 下:低温側)	AMTEC	蒸気 タービン
AMTEC-HX 併用: AMTEC 効率最大	254.8	140.2	344.8	500 250	400 290	400 210	19.7	38
AMTEC-HX 併用: 熱流速最大	"	"	"	" "	" "	" "	10.1	"
AMTEC 単独: AMTEC 効率最大	395	—	324.7	500 305	— —	" "	17.8	"
AMTEC 単独: 熱流速最大	"	—	352.1	500 305	— —	" "	10.9	"

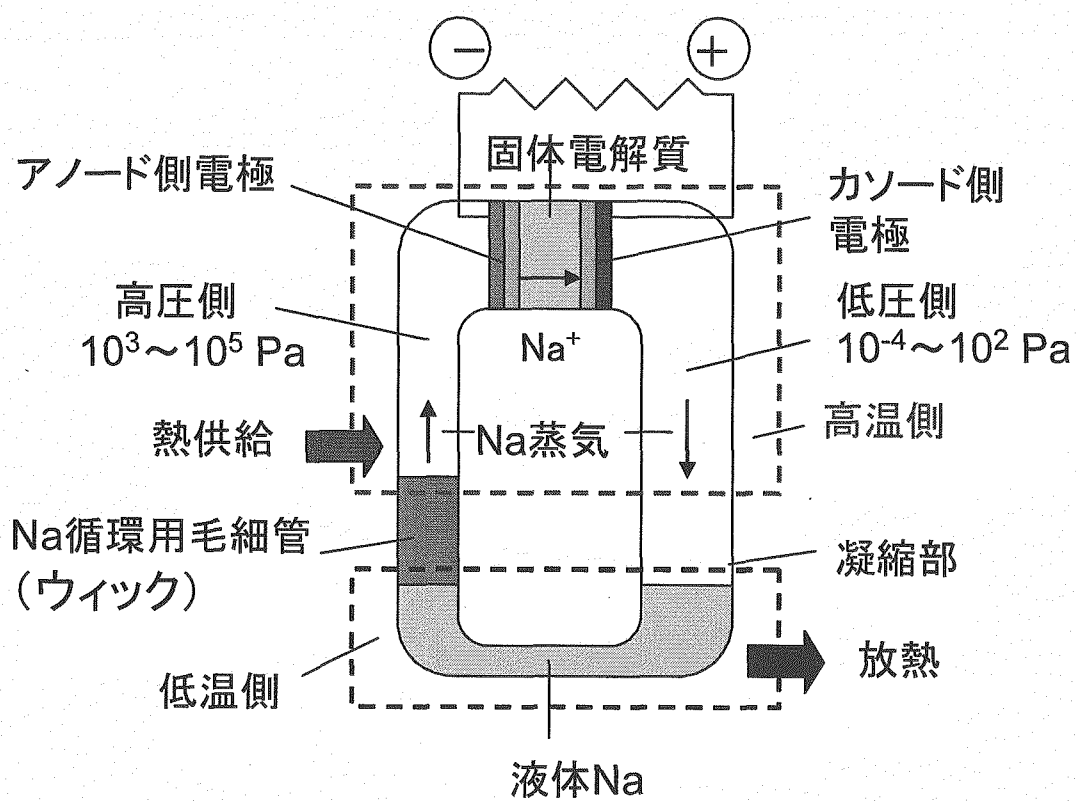


図1 AMTEC 発電原理

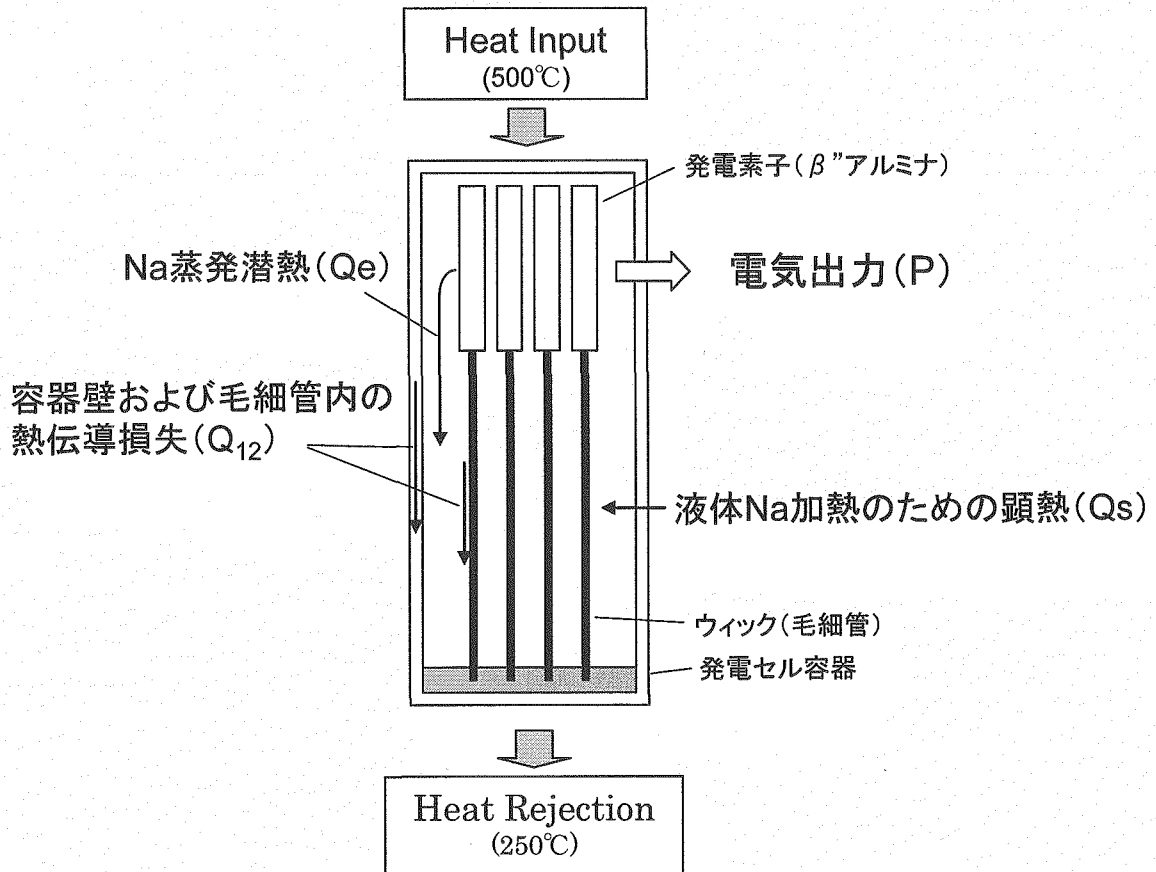


図2 AMTEC 熱損失

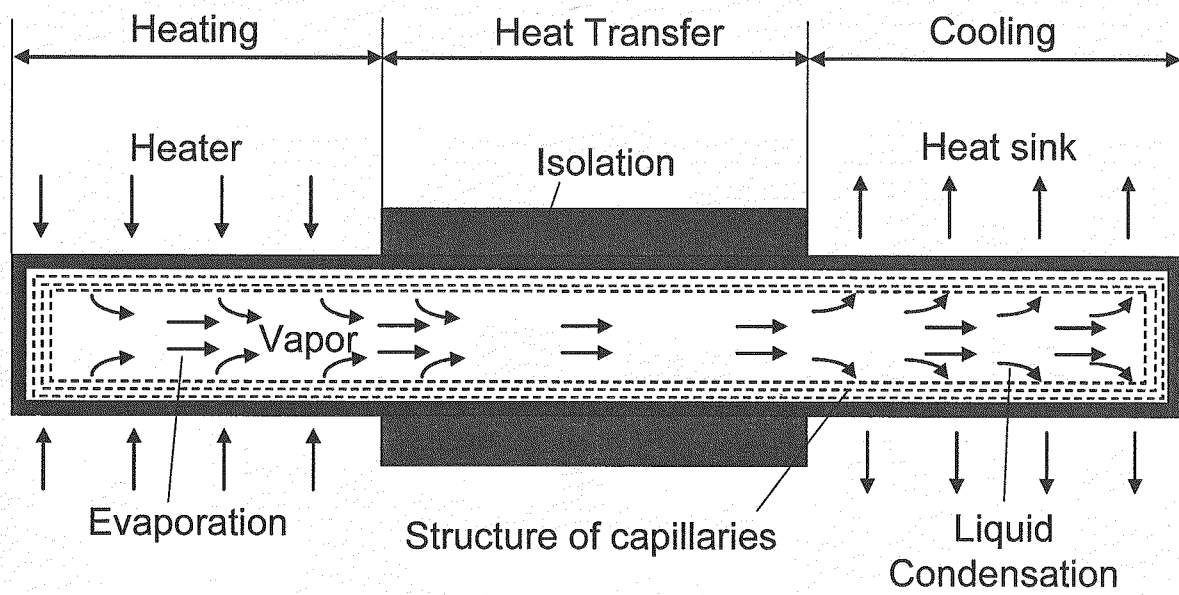


図3 ヒートパイプ概念

(参考文献(4)より引用)

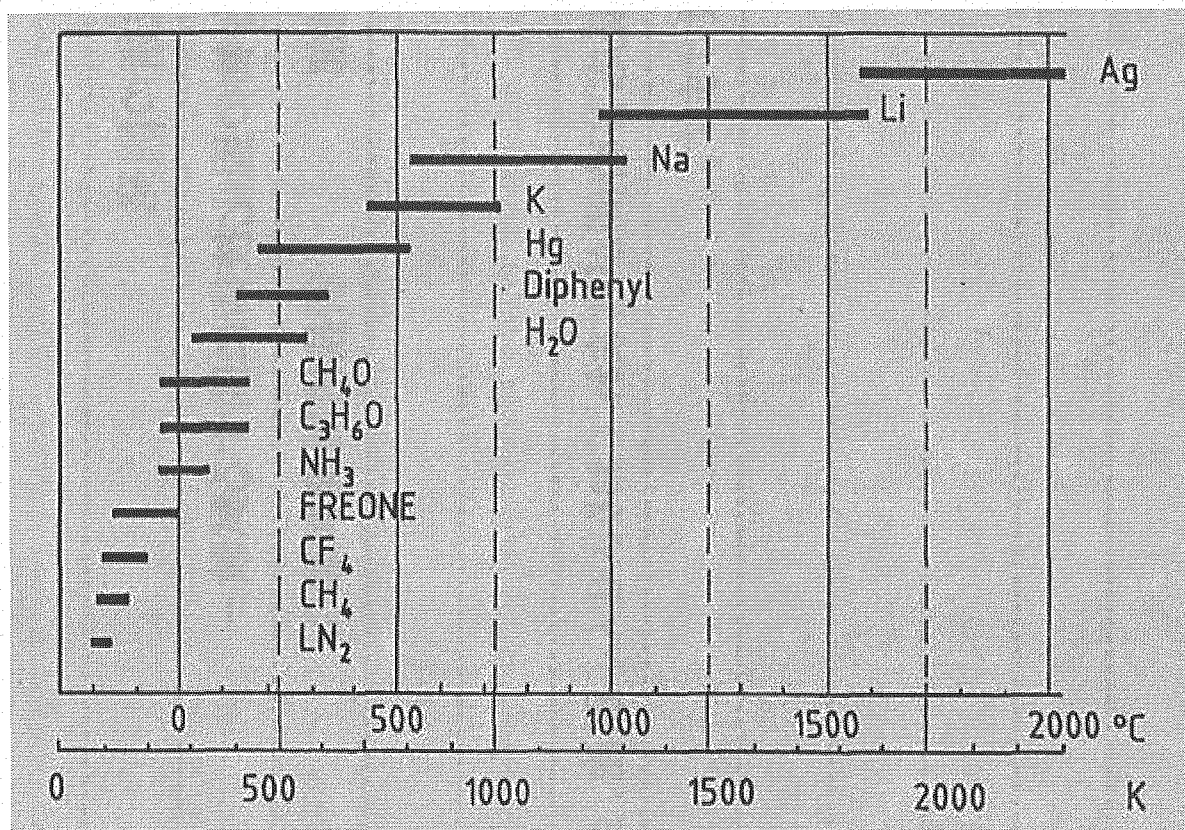


図4 ヒートパイプ用熱輸送媒体使用温度域

(参考文献(4)より引用)

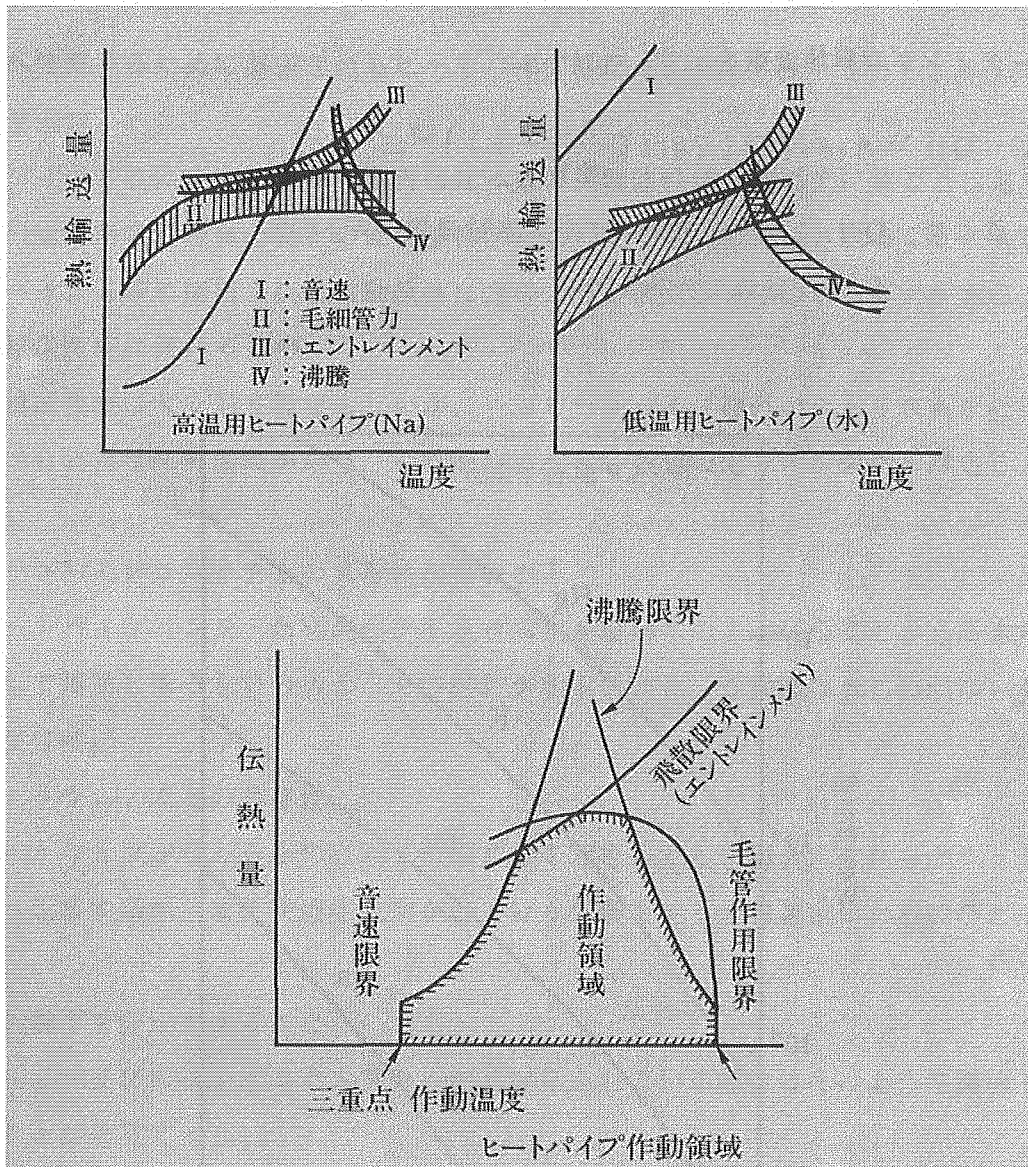


図5 ヒートパイプの熱輸送限界

(参考文献(5)より引用)

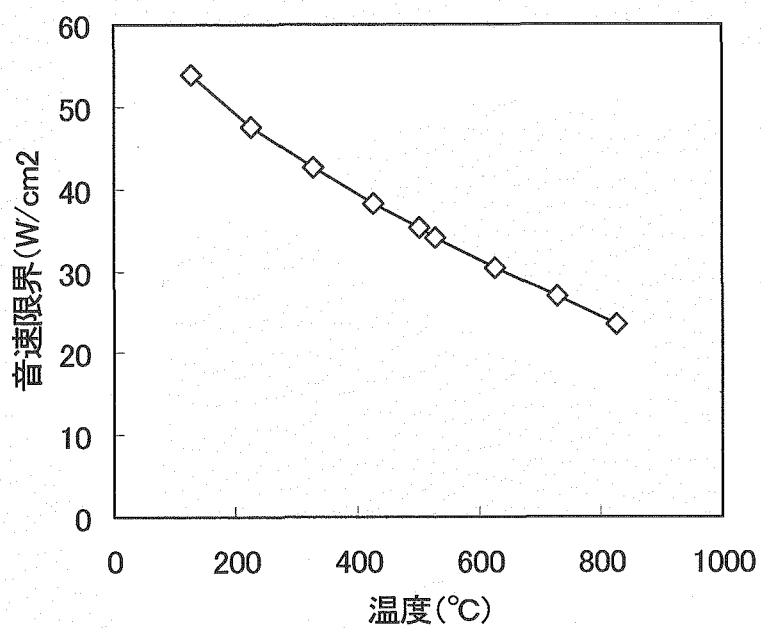


図6 低温作動型 AMTEC セルの音速限界評価結果
(底面直径 3cm)

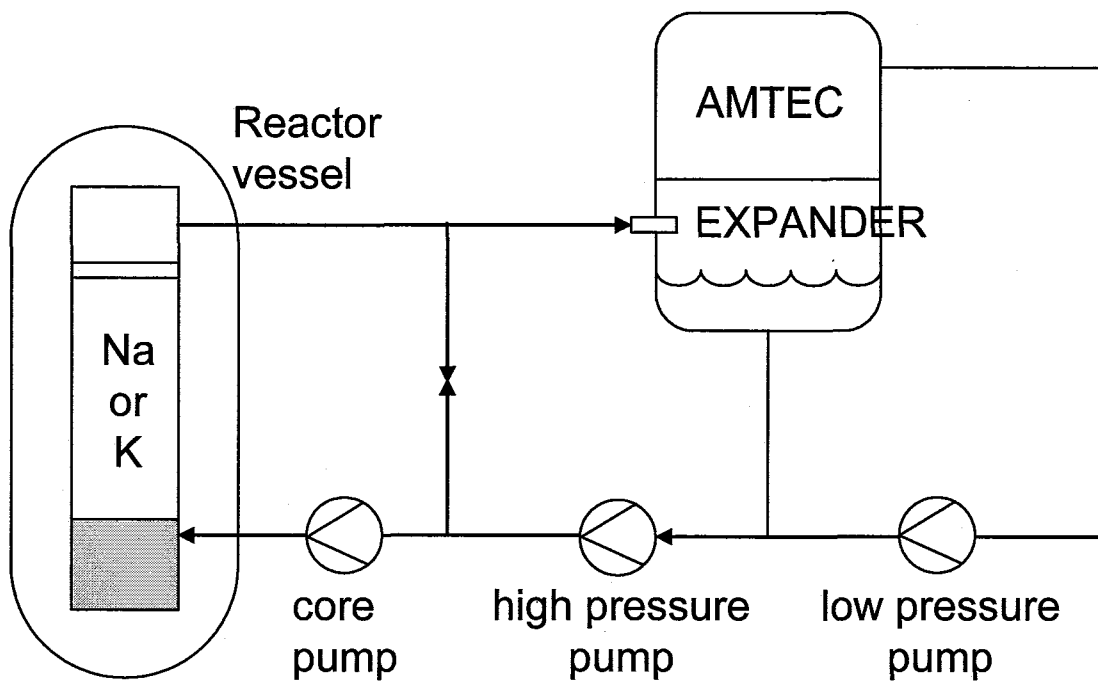


図7 ループ型炉でエキスパンダーを持つ
アルカリ金属直接利用概念 (DC)

(参考文献(7)より引用)

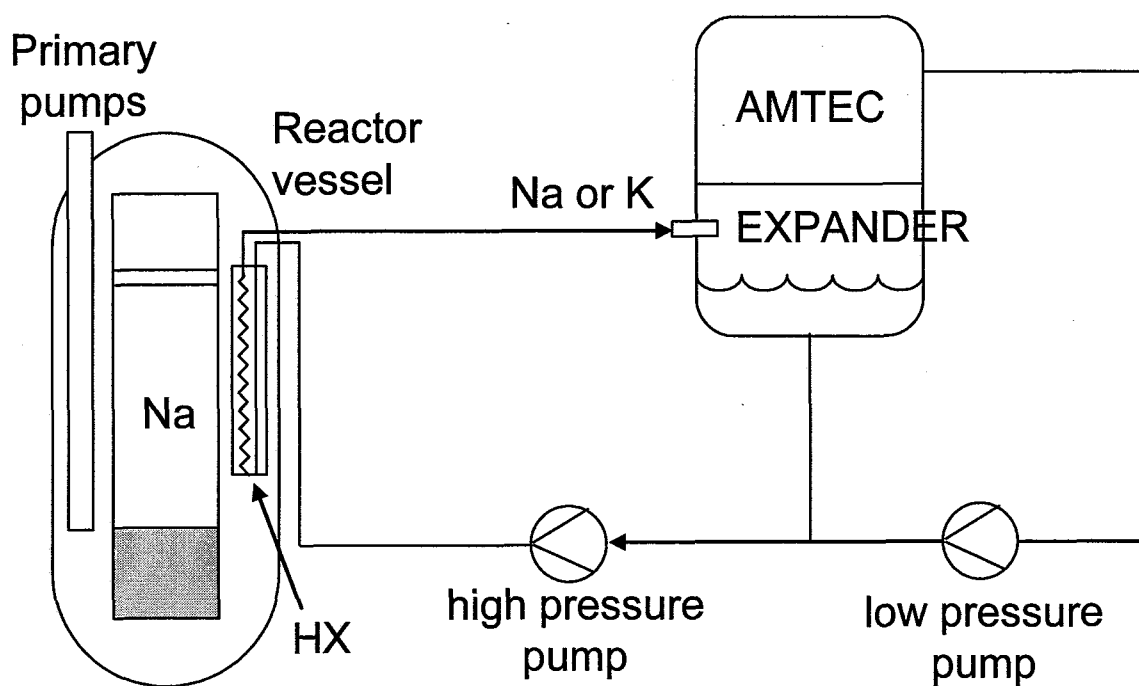


図8 プール型炉でエキスパンダーを持つ
アルカリ金属間接利用概念 (IC)

(参考文献(7)より引用)

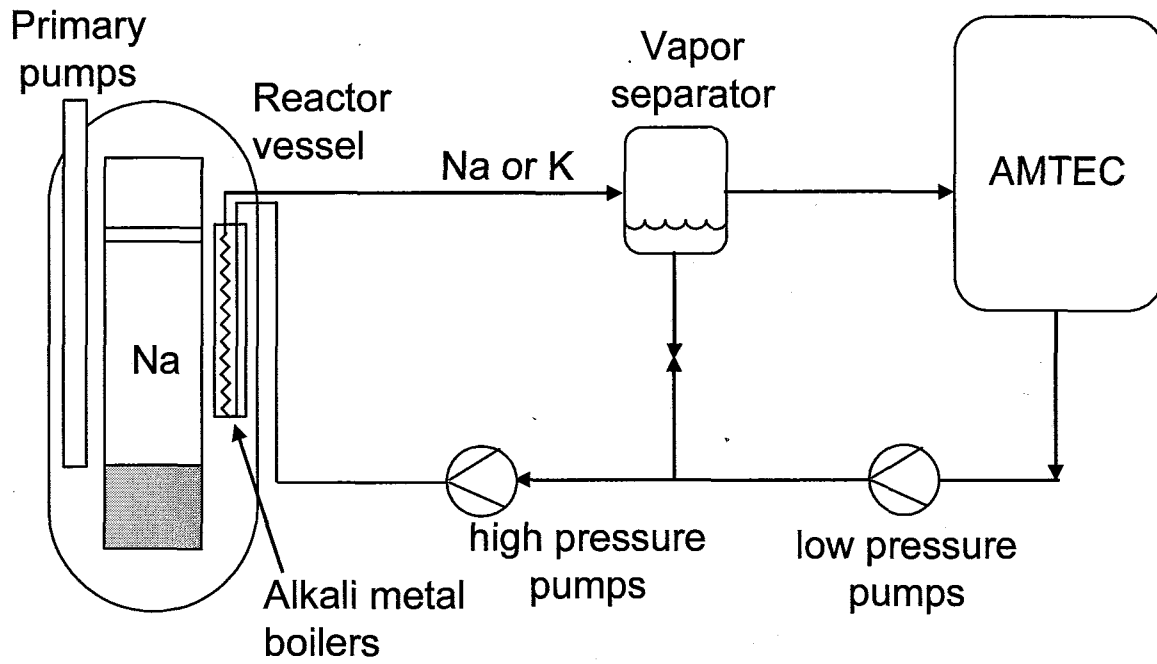


図9 プール型炉でボイラーを持つアルカリ金属間接利用
概念 (IC)

(参考文献(4)より引用)

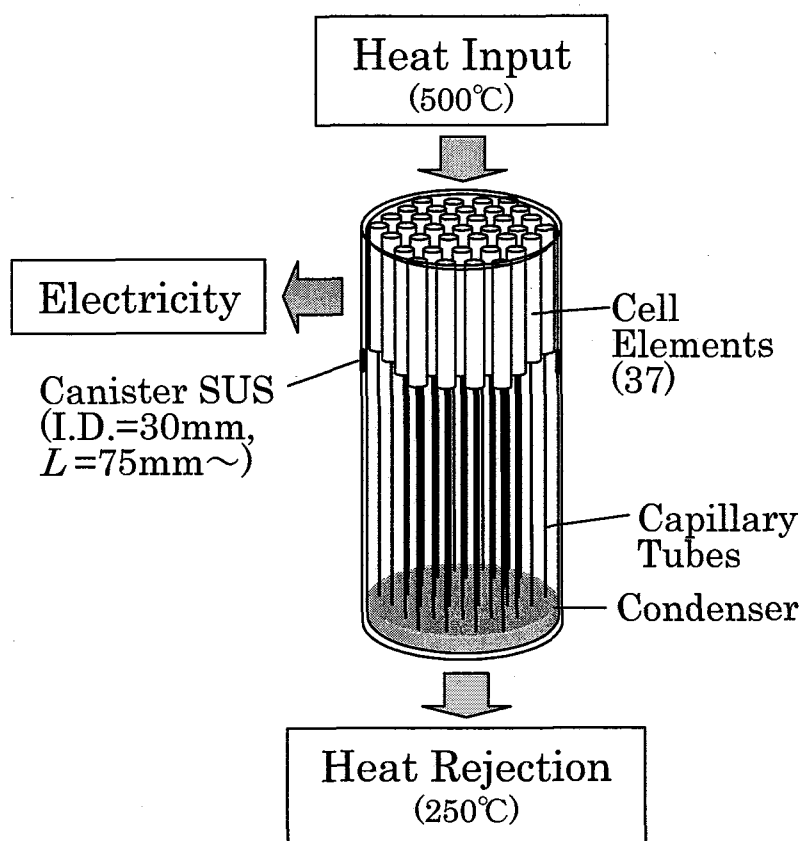
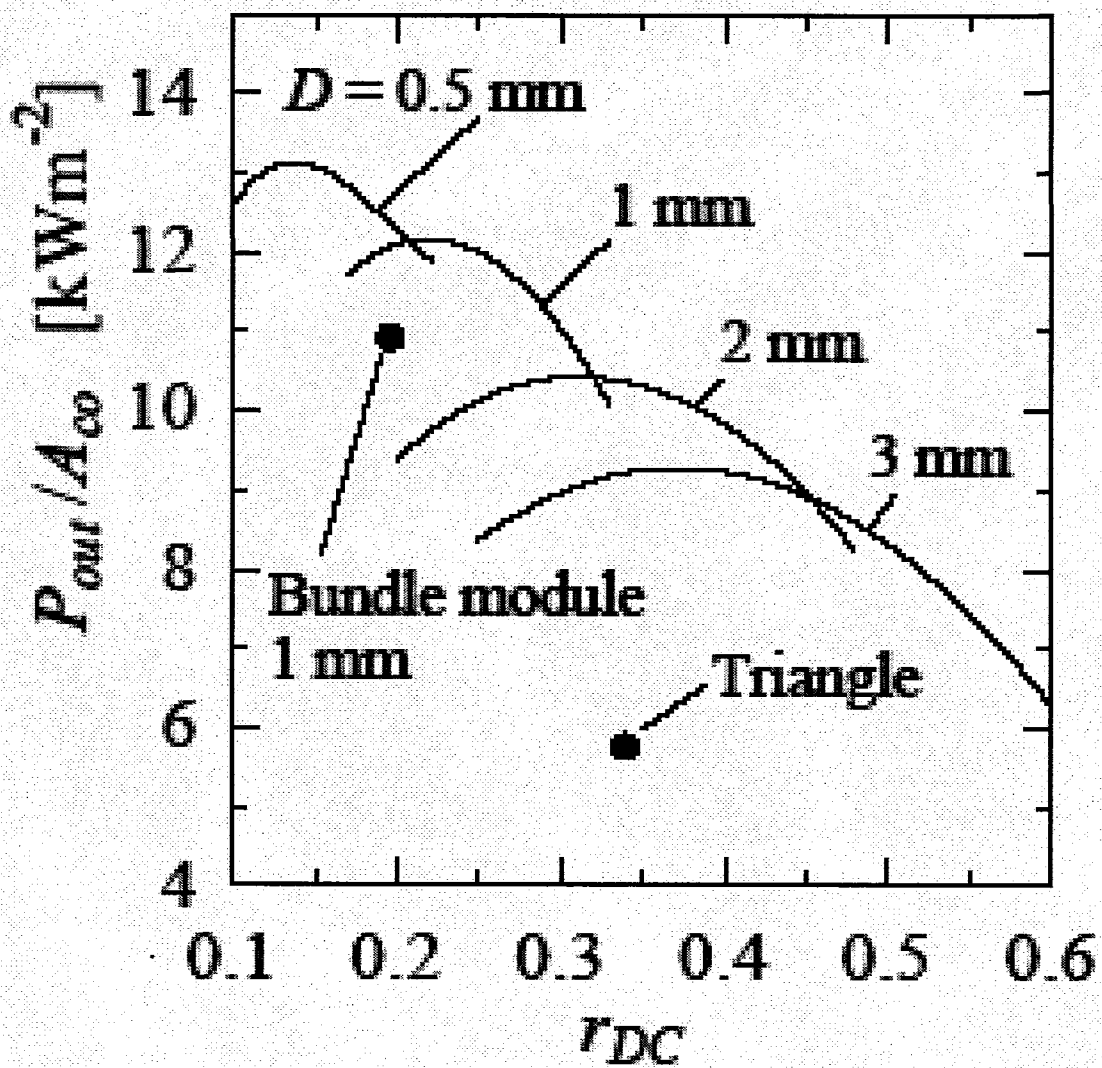


図 1 0 小型 AMTEC 発電セル概念

(参考文献(1)より引用)



A_{co} : 容器底面積、 r_{DC} : BASE管底面積/ A_{co}

図 1 1 小型素子最適配置計算結果

(参考文献(2)より引用)

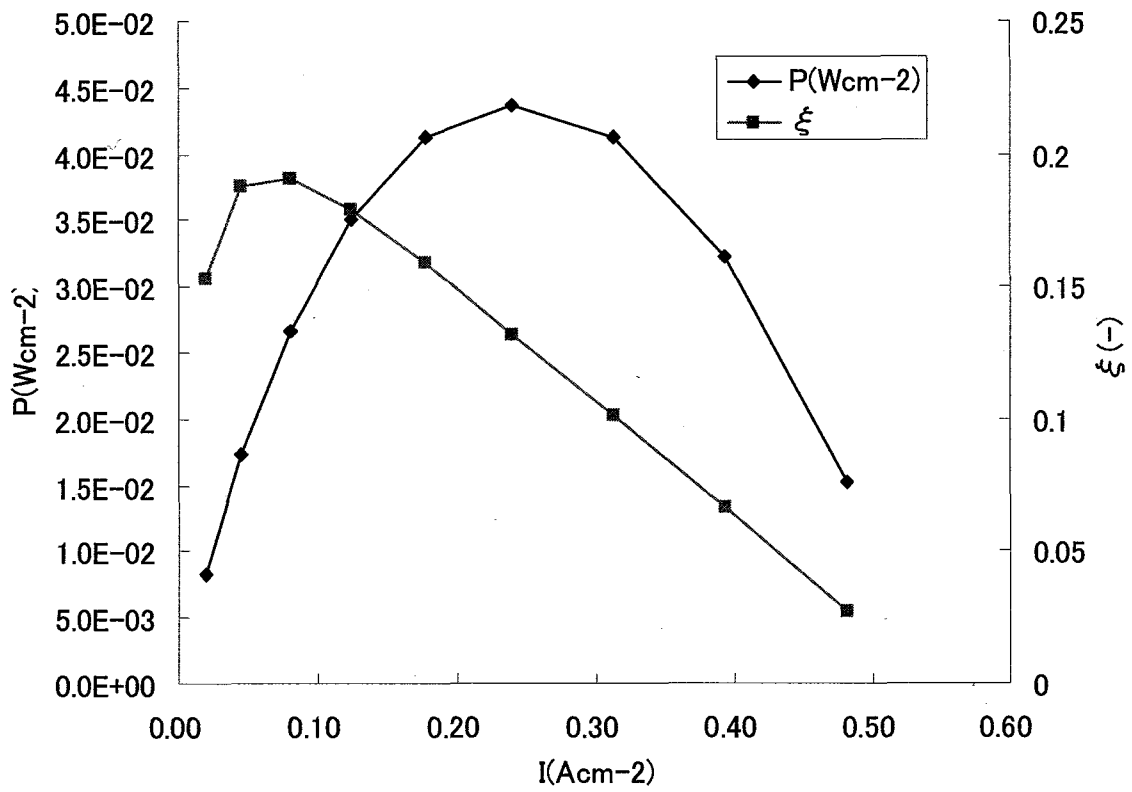


図 1 2 電流密度と出力、発電効率の関係

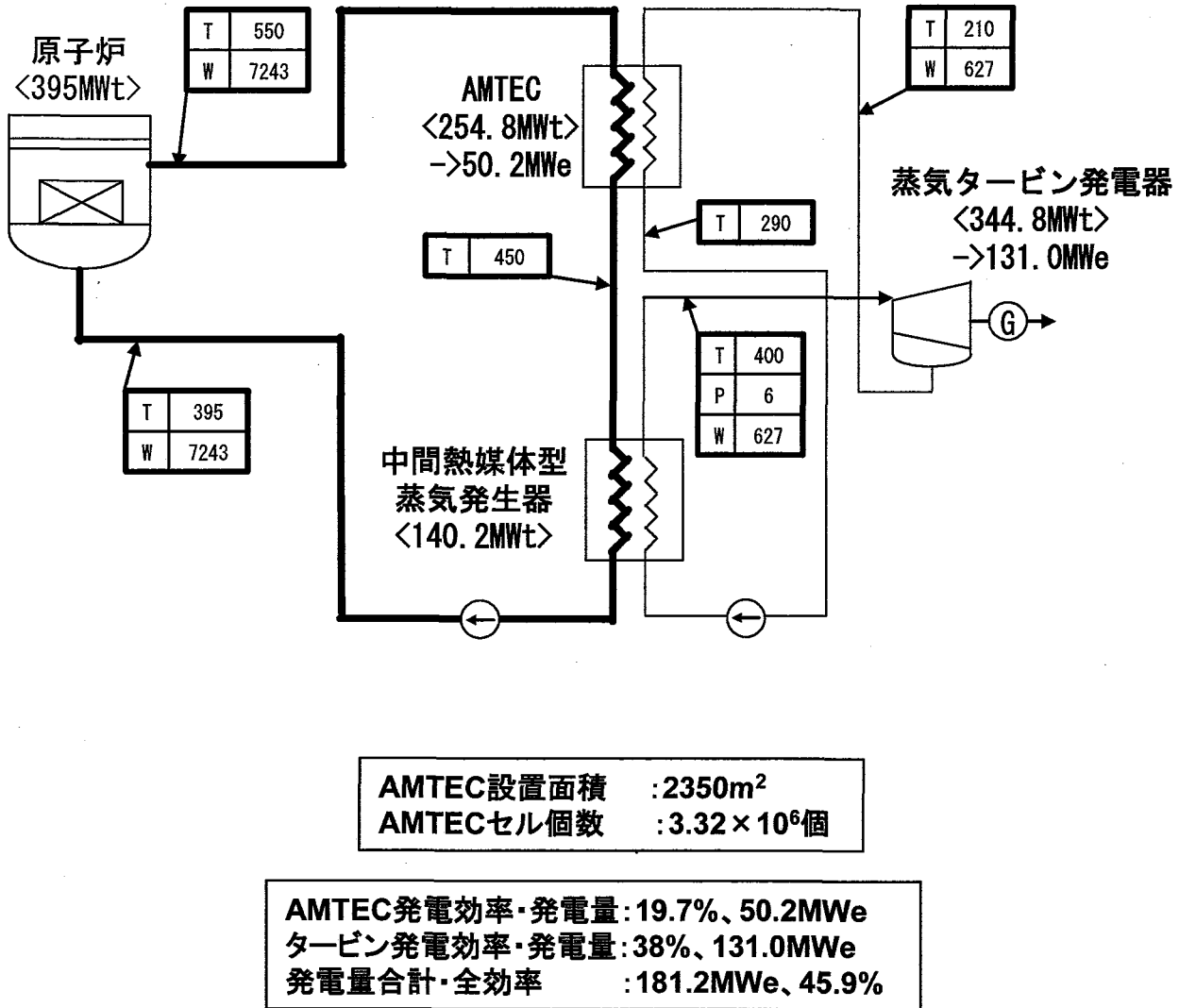
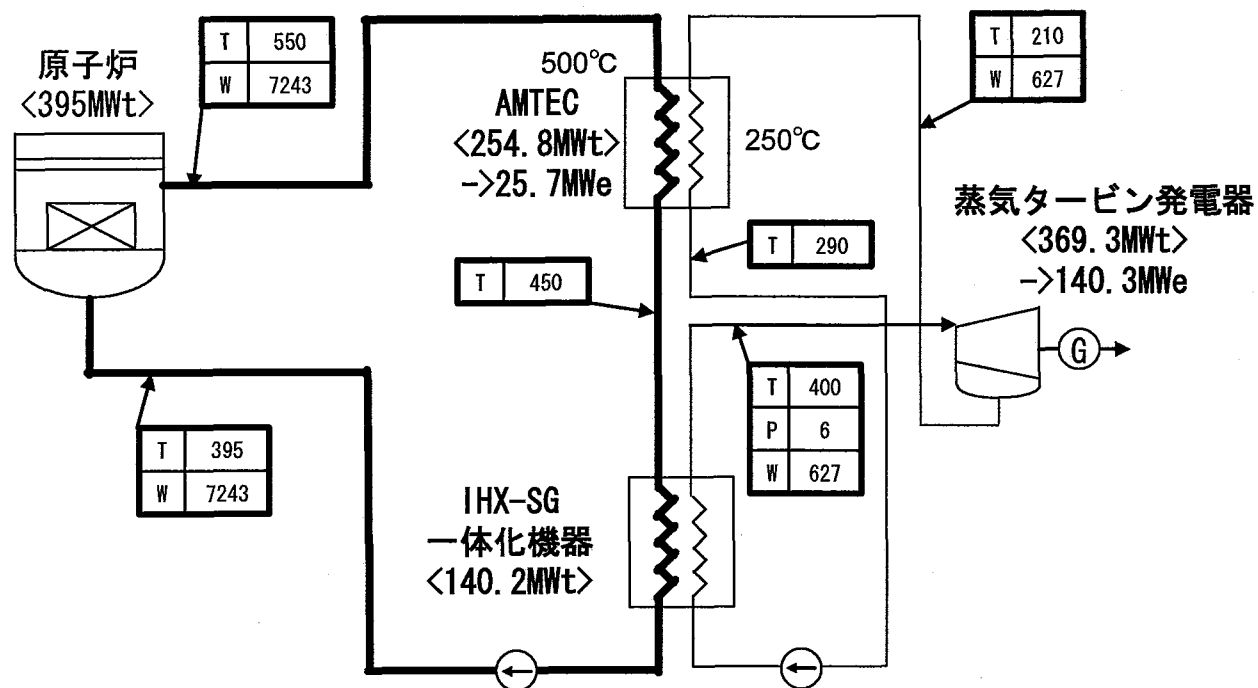


図 1 3 小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果
(AMTEC-HX 併用 : AMTEC 効率最大ケース)



AMTEC設置面積	: 755m ²
AMTECセル個数	: 1.07 × 10 ⁶ 個

AMTEC発電効率・発電量	: 10.1%、25.7MWe
タービン発電効率・発電量	: 38%、140.3MWe
発電量合計・全効率	: 166.1MWe、42.0%

図 1 4 小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果
(AMTEC-HX 併用 : 熱流速最大ケース)

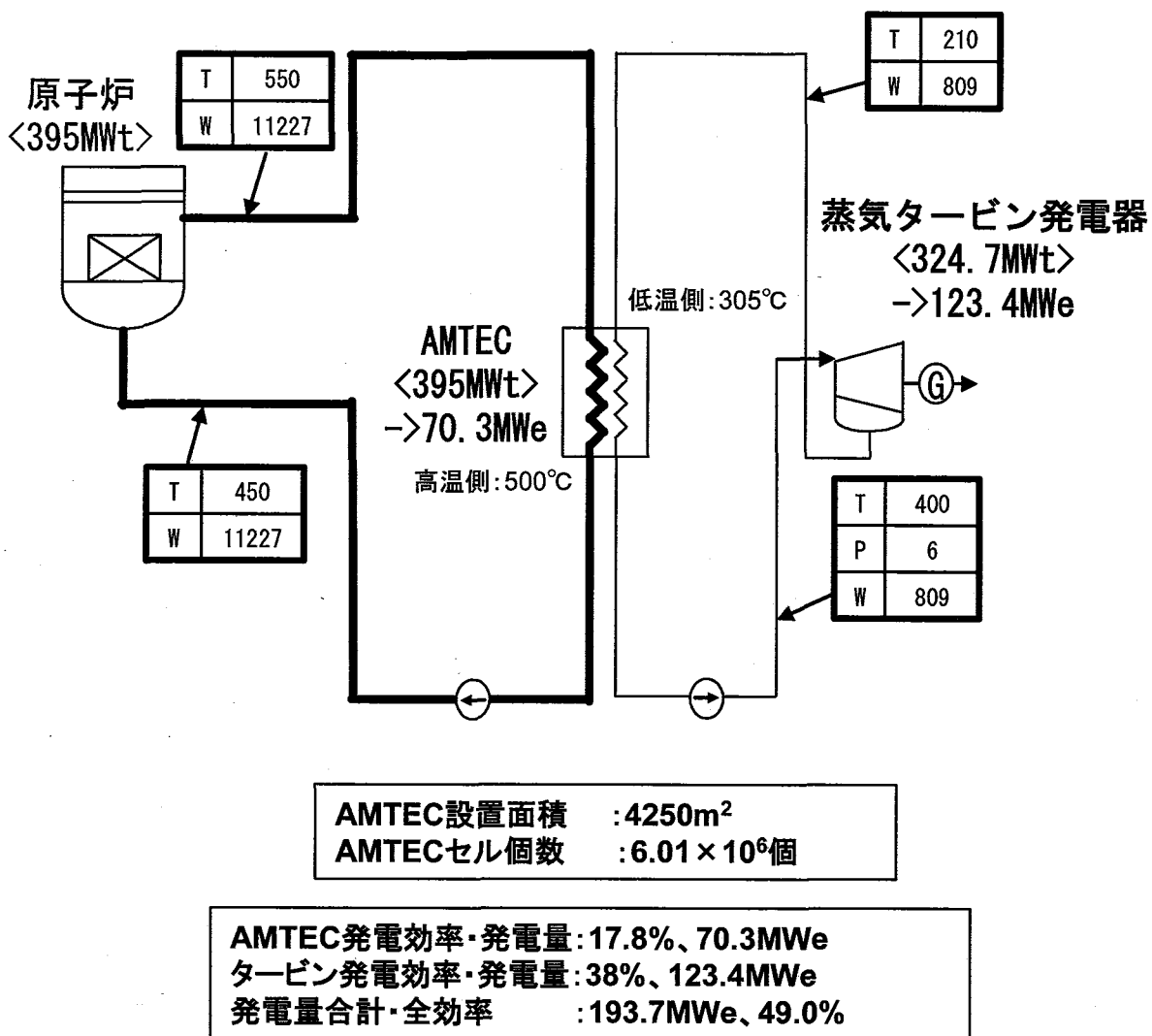
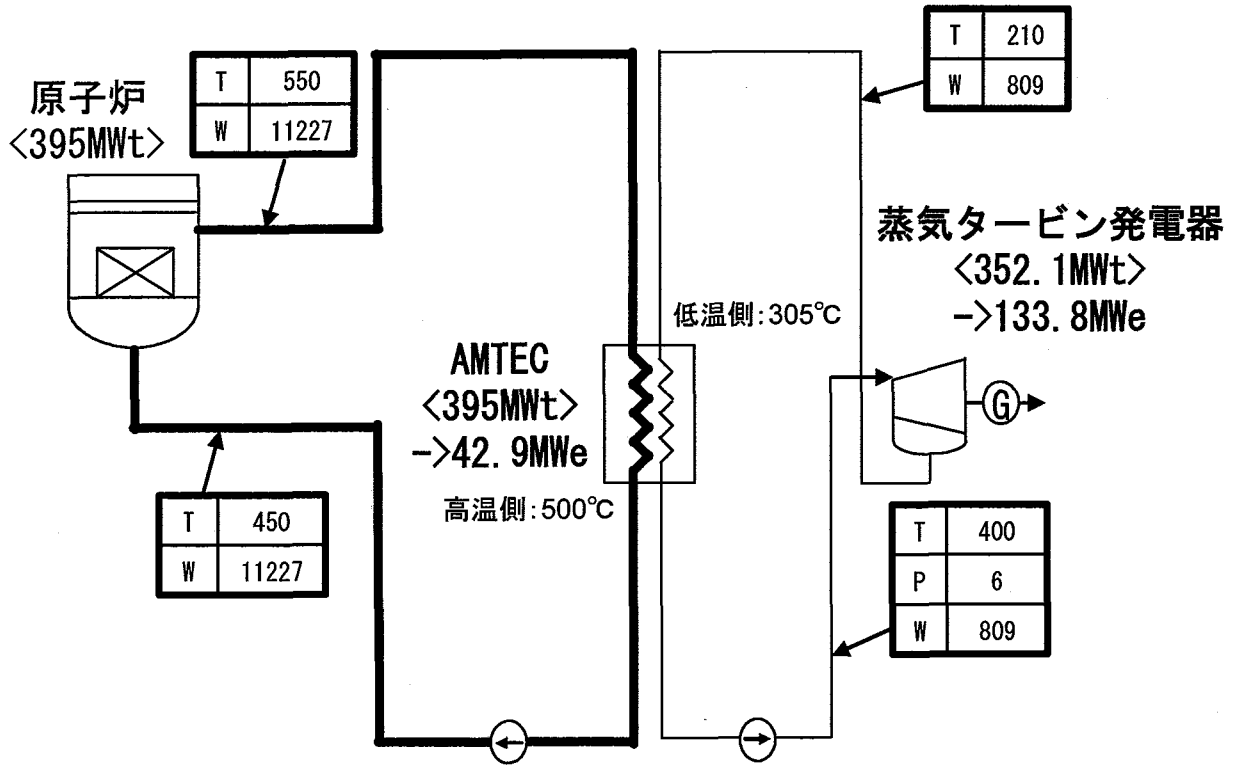


図 1 5 小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果
(AMTEC 単独 : AMTEC 発電効率最大ケース)



AMTEC設置面積	:1360m ²
AMTECセル個数	:1.92×10 ⁶ 個

AMTEC発電効率・発電量	:10.9%、42.9MWe
タービン発電効率・発電量	:38%、133.8MWe
発電量合計・全効率	:176.7MWe、44.7%

図 1 6 小型高速炉への AMTEC 発電システム適用結果
(AMTEC 単独 : 熱流速最大ケース)

付録一 1 AMTEC 発電性能評価プログラム出力リスト

```

T1 = 578.15          ' [K] condenser temperature
alh = 0.5           ' [-] transfer coefficient
B = 1000            ' [AK0.5/m2Pa] temperature independent exchange current
G = 20              ' [-] electrodes' porosity factor
rc = 0.1            ' [Ωcm2] collector to electrode contact resistance
rL = 0.0            ' [Ωcm2] collector lead resistance
BASEt = 0.0003     ' [m] BASE thickness
r2 = rc + rL        ' [Ωcm2] total resistance per electrode
F = 96487           ' [C/gmol] the Faraday
M = 0.0229898      ' [kg/mol] Molecular weight of Na
R = 8.314           ' [J/molK] Gas constant
pai = 4.000000000000000 * ATN(1.000000000000000)
' output file
' Dim aaa As String
' aaa = "C:\¥*** ** *.txt"
' Open aaa For Output As #1

FOR T2 = 773.15 TO 973.15 STEP 100      ' [K] Temperature of liquid Na or BASE
  p2 = 10 ^ (9.5267 - 5220 / T2)         ' [Pa] Vapor pressure of Na at T2
  p1 = 10 ^ (9.5267 - 5220 / T1)         ' [Pa] Vapor pressure of Na at T1
  j00 = B * p2 / T2 ^ 0.5
  EOC = R * T2 / F * Log(p2 / (T2 / T1) ^ 0.5 / p1)
                                          ' [V] Open circuit cell potential

  E0max = 0
  Imax = 0
  Pmax = 0
  kusaimax = 0          ' [-] max. conversion efficiency
  poe = (T2 / T1) ^ 0.5 * p1
  dEO = 0.001
  FOR EO = EOC - dEO TO 0.000000000000000 STEP -1 * dEO

    Call Wcal(T1, T2, EO, alh, B, G, BASEt, r2, P, I, p2, poe, j00, EOC)
    Call kusaical(T1, T2, I, P, kusai)
    If kusai > kusaimax Then          ' in case of max. conversion efficiency

```



```

        kusaimax = kusai
        E0max = E0
        Imax = I
        Pmax = P
    End If
    ' Print E0, I / 10000, P / 10000'
Next E0
Print T2; "[K]", T2 - 273.15; "[C]", kusaimax * 100; "[%]", Pmax / 10000; "[Wcm-2]"
' Print #1, T2 - 273.15, kusaimax * 100, Pmax / 10000
Next T2
Close #1
END

```

```

'SUB for system efficiency kusai
EXTERNAL Sub kusaical(T1, T2, I, W, kusai)
    Call naetcal(T1, T2, naet)
    Call nalcal(T2, nal)
    F = 96485
    M = 0.02299
    QS = I * M * naet / F
    QE = I * M * nal / F
    Q12 = 1.000000000000000 * (T2 - T1) ' この括弧の前の係数が k12
    kusai = W / (W + QE + QS + Q12)
End Sub

```

```

'SUB for Na liquid entalpy T1, T2 [K], naet [J/kg]
EXTERNAL Sub naetcal(T1, T2, naet)
    A1 = -362.379: A2 = 1.74337: A3 = -0.000645934
    A4 = 0.000000350461: A5 = -6.04716E-11
    naett1 = (((A5 * T1 + A4) * T1 + A3) * T1 + A2) * T1 + A1
    naett2 = (((A5 * T2 + A4) * T2 + A3) * T2 + A2) * T2 + A1
    naet = (naett2 - naett1) * 1000.000000000000
End Sub

```

```

'SUB for Na latent heat of evaporation T [K], nal [J/kg]
EXTERNAL Sub nalcal(TK,

```

```

TC = TK - 273.15
A1 = 4536.65: A2 = 0.115574: A3 = -0.00200342
A4 = 0.00000149893: A5 = -0.000000000375315
nal = (((A5 * TC + A4) * TC + A3) * TC + A2) * TC + A1) * 1000.000000000000

```

End Sub

' SUB for electrode performance

```

EXTERNAL Sub Wcal(T1, T2, EE, alh, B, G, BASEt, r2, W, J, p2, p1, j00, EOC)
A1 = 0.000403: A2 = 1420: A3 = 0.000000324: A4 = 4725
rtotal = BASEt * 100 * T2 * (A1 * Exp(A2 / T2) + A3 * Exp(A4 / T2)) + r2
F = 96487
M = 0.0229898
R = 8.314
pai = 3.14159
E1 = 0
E2 = EOC
nnn1 = 0
1 nnn1 = nnn1 + 1
Ec = (E1 + E2) / 2.0000000
ppe = 0.75 * G * (M * R * T2 / 2 / pai) ^ 0.5 / F
pe = (2 * pai * M * R * T2) ^ 0.5 / F
fs = F / R / T2
kf = ppe + pe
nume = p2 * Exp(-1 * alh * Ec * fs) - p1 * Exp((1 - alh) * Ec * fs)
deno = p2 + kf * j00 * Exp((1 - alh) * Ec * fs)
J = j00 * nume / deno
E3 = Ec - J * rtotal / 10000
If Abs(E3 - EE) < 0.0005 Then GoTo 2
If E3 > EE Then LET E2 = Ec Else LET E1 = Ec
If nnn1 > 100 Then
    Print "nnn1 over"
    Stop
End If
GoTo 1
2 W = EE * J
END SUB

```