

# 熱利用を目的とする原子力エネルギー

電熱併給方式は、将来性のある核エネルギー利用の一例である。

世界エネルギー会議が言及したように、エネルギーの供給量はこののち何年かは、増大する世界人口のニーズに応えるため、とくに電力部門で増加して行くことになる。同時にまた、化石燃料の燃焼からの二酸化炭素およびその他のガスの放出にともなう温室効果を含む環境問題は、気候変動に関する国際会議やその他の機関の会議で、重大な挑戦を提起するものとなっている。

原子力エネルギーはこのような問題の解決に寄与すべきポテンシャルを備えており、すでに重要な環境的なメリットを有する貴重なエネルギー源としての地位を確立するようになってきている。原子力が現時点で世界の電力生産に占めるシェアは約17%である。

しかし、現段階では、まだ原子力の持つポテンシャルの一部が実現されているにすぎない。住民、産業およびその他の目的のために、電力と熱を生産し、十分なエネルギー供給を行うことによって、原子力技術はこれまでよりもさらに大きな役割を演じることが可能である。

## エネルギー利用の特性

世界全体で、一次エネルギー総量の約30%が電力生産に利用されている。残りの70%の大部分は輸送用に使われるが、温水、蒸気、熱等に転換されている。このことは、非電力市場、

とくに温水および蒸気のための市場が比較的大きいことを示している。

核エネルギーは現在、24か国を超える国々で発電のために利用されている。総設備容量約324 GWeにおよぶ、423基の原子力発電プラントが現在運転中であり、さらに約80 GWeにおよぶ80基の発電所が建設中となっている。このうち温水および蒸気の供給に利用されているプラントは2~3基だけである。これらのプラントの総設備容量は5 GW (th) 以下であり、運転している国も少数に過ぎず、主としてカナダおよびソ連において実施されているだけである。

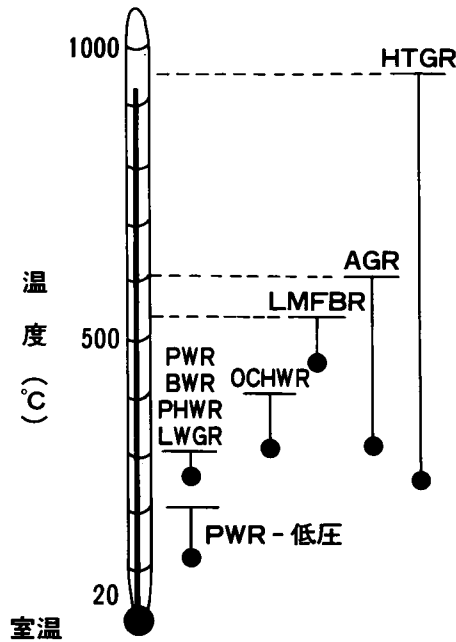
原子力による発電および熱生産における相互間に見られる不均衡には多くの理由が考えられるが、この中には電熱併給市場の分散をはじめ、送・配電網の規模、熱生産に関する代替エネルギー源の低コスト、ならびに輸送および流通関連の高コスト等が含まれている。

熱利用に関しては、具体的な温度要件は大きく変動している(グラフ参照)。農工業、地域暖房、海水脱塩等への温水および蒸気の利用に関する室温と同程度の低温から、化学工業に対するプロセス蒸気および熱、ならびに強化石油回収をはじめ、オイル・シェールおよびオイル・サンド処理、石油精製プロセスおよびオレフィン生産、さらに石炭および褐炭の精製などへの高圧注入蒸気の1000°Cにいたるまで、変動領域は大幅なものとなっている。水素生産のた

H・バーナート<sup>1)</sup>  
V・クレット  
J・キューピッツ

1) バーナート氏はドイツのユーリッヒ研究センターに所属しており、またクレットおよびキューピッツの両氏はIAEAの原子力発電部部長である。

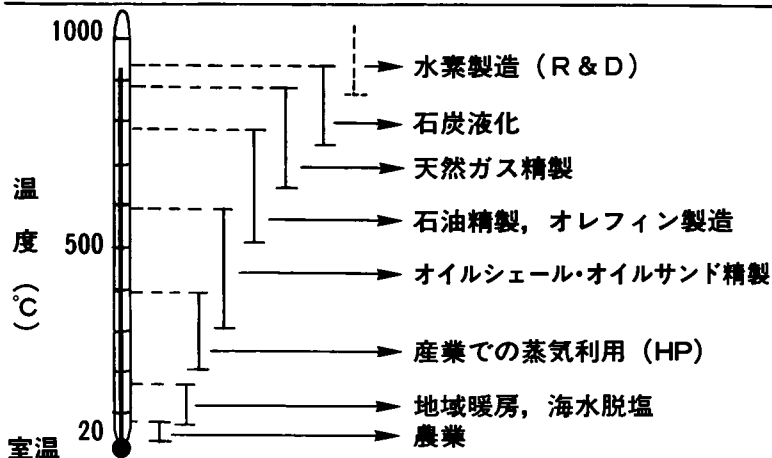
各種炉型ごとの利用可能な温度



めの水分解プロセスは最高温度領域にある。550°Cまでは、熱は蒸気によって供給することができるが、それ以上になると、蒸気圧は550°Cを大きく超えるもので、各種要件は直接にプロセス・ヒートにより満たされることになる。原子力により供給されるプロセス・ヒートの上限が1000度設定されているのは、原子炉金属材料の長期的な強度能力に基づいたものである。

もちろん、鉄鋼生産などのように温度条件が1000°Cを上回る工業プロセスもいくつかある。このようなプロセスでは、原子力はたとえ

各産業分野で利用される温度領域



ば電気、水素、合成ガスといった二次エネルギーの媒体を通してのみ利用することが可能となる。

原子炉の各種能力

すべての原子力プラントで、原子炉炉心における主要なプロセスは原子力エネルギーの熱変換である。従って、原則的には、すべての原子炉はプロセス・ヒートの生産に利用できることになる。しかしながら、実際には、2つの基準が決定的要素となっている。すなわち、発生する熱の温度（一次冷却材）および発生する蒸気の圧力である（場合による）。

第一の要因に関しては、水冷却炉は300°Cに及ぶ熱を提供している。このタイプの原子炉には、加圧水型軽水炉（PWR）、沸騰水型軽水炉（BWR）、加圧重水炉（PHWR）および軽水冷却黒鉛減速炉（LWGR）が含まれる。有機冷却重水減速炉（OCHWR）はおよそ400°Cの温度に達し、液体金属高速増殖炉（LMFBR）は540°Cにおよぶ熱を発生する。ガス冷却炉の場合はさらに高い温度に到達し、改良型ガス冷却黒鉛減速炉（AGR）については650°C、高温ガス冷却黒鉛減速炉（HTGR）については950°Cとなっている（グラフ参照）。

一次冷却材の最高温度のほか、重要な考察対象となるのは、冷却材の入口と出口の間の温度差である。

発生蒸気の圧力は、この蒸気が強化石油回収領域の利用に提供されるのに及び、重要な要素となる。石油資源の所在が深ければ深いほど、注入蒸気の圧力は高くなければならない。このため、水以外の一次冷却材を持つ原子炉タイプ、すなわち OCHWR, LMFBR, AGR および HTGR 等が有利となる。これらの原子炉はおよそ500メートルの深度にある油田に関して、比較的高度の圧力（たとえば10 MPa）を備えた注入蒸気を容易に発生することができる。水冷却炉に関しては、このような圧力を達成するためには、蒸気圧縮の付加的な措置を講じる必要があるだろう。

### 発電・発熱の熱動特性

すでに述べたように、原子炉における主要な転換プロセスは、原子力エネルギーの熱変換である。

転換された熱は直接加熱目的のために、“専用”運転モードで利用するが可能である。この場合には、電力は生産されない。

もうひとつの方式は電熱併給（コジェネ）である。並行形式の電熱併給は、蒸気発生器の二次側からタービンに入るまえに、若干の蒸気を抽出することによって行われる。シリーズ形式の電熱併給は、タービン内における蒸気拡大の期間、当該蒸気が意図した利用に適合する温度を持つに至った時点で、蒸気の一部または全部を抽出することによって行われる。このサイクルの期間、抽出された蒸気は電力生産に用いることも可能である。シリーズ形式の電熱併給は、地域暖房、脱塩、農業などに関連する工業プロセスに適合する方式である。

### 現在行われている利用の実例

現在、いくつかの国で原子力プラントが温水および蒸気の生産のために利用されている。これらのプラントの総設備容量は5 GW (th) 以下である。

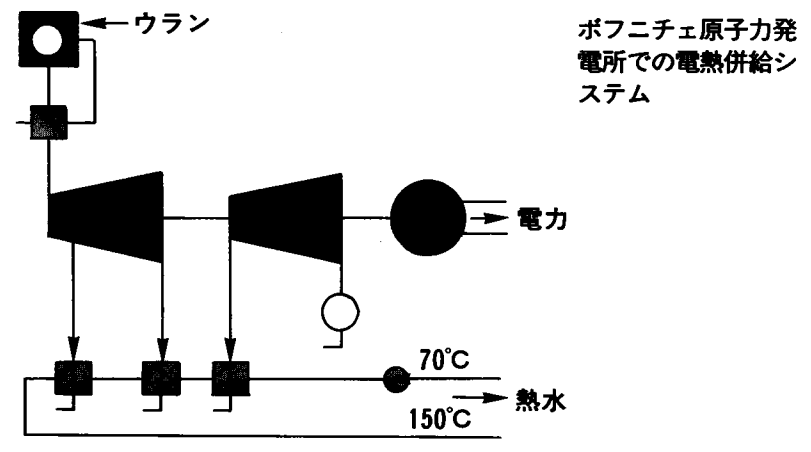
これら各国では、電熱併給の多くの経験が得られているが、特にソ連において顕著である。この経験は、ソ連のペロヤスク、クルスク、ノボボロネジ、ロブノ、コルスカヤ、中国の清華大学、カナダのブルース、チェコスロバキアのボフニチェ、スイスのゲスゲンおよびベツノウ、ならびにドイツのシュターデの各原子炉で得られている。

以下はこれらの利用例の概略である。

**中国における熱供給用原子炉** 北京の清華大学原子力研究所 (INET) で、1989—1990年の冬季の間、設備容量5 MW (th) の熱供給原子炉が運転を開始した。IHETセンターへの熱供給に利用されているこの原子炉の運転経験はきわめて良好である。この原子炉の設計はPWRの設計原理に基づいている。一次回路の

設計圧力は1.5 MPa (通常のPWRに比べ10倍程度小さい)で、一次ループの温度条件は186/146°Cとなっている。中間ループの温度は1.7 MPaで160/110°Cとされ、配熱系統の温度は90/60°Cとなっている。

**カナダにおける並行式プロセス蒸気・熱併給方式。** プロセス蒸気の大規模利用のひとつは、カナダのオンタリオにあるブルース原子力発電所で行われている。このサイトにあるCANDU型原子炉は6000 MW (e) を超える電力を生産する能力を備えるとともに、オンタリオ・ハイドロ社および近接する工業エネルギー・パークで利用されるプロセス用の蒸気と熱を供給す



ることが可能である。

ブルース A 原子力発電所は電力生産を行っている 825 MW (e) の 4 基のプラントで構成されており、発電のほか蒸気変換プラントへの蒸気供給も行っている。このプラントは重水生産プラント用に 720 MW (th) のプロセス用の熱と蒸気を発生しているが、70 MW (th) はブルース・エネルギーセンターに、また 3 MW (th) は、副次的なサービスに振り向けられている。

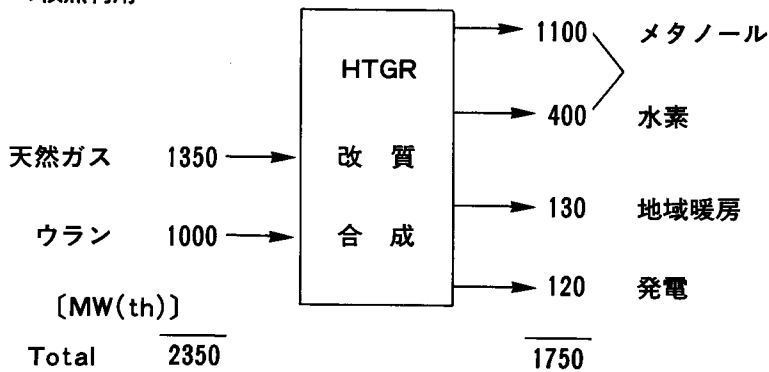
2) 性能係数は以下のように具体的に定義されている。

$$c = H_b / \Delta E$$

この場合、 $H_b$  は生成された熱、 $\Delta E$  は純粋電力生産モードの電力と、電熱併給方式の運転モードの電力との相違を示す。

そのサイクルは並行式の電熱併給方式の典型的なものである。原子炉で発生した核熱は一次熱輸送ループを経由して蒸気発生器に移送される。蒸気はタービンへの蒸気供給と併行して、蒸気発生器の二次側から抽出され、その直接、蒸気変換プラントへ送られる。抽出された蒸気は電力生産には利用されない。

#### 天然ガス精製のための核熱利用



チェコスロバキアにおける地域暖房目的のシリーズ形式の温水併給方式 ポフニチェ原子力発電所は、ソ連の設計による VVER-440/230 ユニット 2 基、および VVER-440/213 ユニット 2 基とで構成されており、全てのユニットが運転中である。各ユニットは 1375 MW(th) の熱出力を持つ原子炉、および水平式蒸気発生器 6 台、ならびに圧縮タービン 2 機で構成されている。プラントは電力とトルナーバ地域の暖房用、工業用、および農業用の低温の熱を併給している。

シリーズの併給サイクルでは、水は 70°C および 150°C の温度に加熱される。タービンからは 60 MW (th) の熱供給が可能となっている。(図表参照)

ソ連における海水脱塩を目的としたシリーズ併給方式 ソ連の西カザクスタン乾燥地帯における天然資源の開拓は、水および電力の供給をめぐる問題が解決を見たことにより、ようやく

実施可能となった。この問題解決のための努力に重要な貢献を果たすこととなったのは、終始一貫してシェフチェンコのコンビナートであった。このコンビナートには BN-350 型高速増殖炉 1 基のほか、火力発電所 2 基および熱蒸留装置を装備した脱塩プラント 1 基が含まれており、海水脱塩に原子炉を利用する実証プラントとしては、世界で最初の、そして現時点においては唯一のプラントを構成するものとなっている。

プロセスでは、BN-350 の蒸気発生器およびボイラー 1 基が数種類のタービンに蒸気を供給しており、また BN-350 からの 4.5 MPa、450°C の蒸気は、背圧タービンおよび圧縮タービンに振り向けられている。背圧タービンからの蒸気は脱塩装置および同地域の工業企業体に振り向けられる。

シェフチェンコ・コンビナートは、商業用火力脱塩関係のものとしては、ソ連で最大規模のセンターである。コンビナートで現在運転中の脱塩は 12 基となっており、1 日あたりの蒸留総量は 14 万 m<sup>3</sup> に達する。

#### 原子力による電熱併給方式の経済性

原子力発電、ならびに温水および蒸気の輸送および配給の基盤機構は、ともに大きな資金を必要とする技術である。原子力発電については、発電自体の経済的な競合力はすでに実証されるところとなっているが、電熱併給方式および熱生産モードに関しては、違ったコスト要因が包含される。

以下に掲げる経験則は利用可能なものである。すなわち、電熱併給方式による熱生産コストは、プラントの性能係数で分類された電力コストに等しい。この係数は考察対象の炉型およびその他のパラメーターにより左右される因子である。<sup>2)</sup>

この経験則を利用した、一例として、ドイツでモジュール方式の高温ガス冷却炉 (MHTGR) に関する電熱併給方式のコスト計算が行われているが、この例では、発電コスト

はKWhあたり5セント、蒸気コストは同じくKWhあたり1.7セント、また温水コストはKWhあたり0.5セントに相当するとなっている。これらのコストは40年の寿命を持つMHTGRの場合の平均化された数字である。

#### 原子力エネルギーと化石エネルギーとの結合

世界のエネルギー利用の80%以上が、石炭、石油、ガス等の化石エネルギー源である。これらの燃料の燃焼はNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>などの放出により深刻な環境問題の原因となることで知られている。

このような問題の解決に助力を与えるため、これまで提案されてきたアプローチのひとつは、エネルギー・システムの結合である。将来の結合方式として考えられる典型的な例は、天然ガスの改質に核熱を利用することである（表参照）。HTGRの改質プロセスとして知られる方式を利用することにより、合成ガス、メタノール、水素、熱および電力等が天然ガスおよびウランから生産されるであろう。このプロセスでは、天然ガスは分解して、主として水素および一酸化炭素に変換する。主要生産物はメタノール、液体炭化水素および水素などである。副産物として熱のおよび電気が生産される。

結合アプローチのもうひとつの例を石油工業に見ることができる。重油の利用のための熱源として原子力を利用することについては、これまでもいくつか調査が行われてきている。これらの調査結果では、好ましい石油市場の条件の下では、原子力のオプションは、従来方式に比べて経済的・環境的なメリットをもつものであることが示されている。

第三の例は、鉄鋼業界における石炭と原子力エネルギーの結合である。技術的観点からは、これはもっとも野心的な結合と言える。この結合方式には、HTGRからの高温ヘリウムで加熱された無煙炭のガス化が含まれている。中間的な生成物としては、合成ガス、および鉄鉱石の還元用いられるコークスであるが、最終的な生成物はメタノールと銑鉄である。

#### 核熱利用の将来性

住居関係ならびに工業関連の利用目的に合うよう、蒸気および熱の供給を行うため、大方の原子力プラントの設備容量を利用したいとする誘因には、かなり強力なものが認められる。

いくつかの国では、原子炉を利用する電熱併給および熱生産は、すでに各種タイプのエネルギー・ニーズに応える有効な手段となっている。この技術をさらに幅広く利用したいとするポテンシャルは将来性が見込めるものに見受けられる。国際レベルの関心も、環境やその他の問題が化石燃料の燃焼によって懸念されるにつれて再び高まってきている。

IAEAはその業務の一環として、原子力に基づく電熱併給および熱供給システムの現状をレビューするため、1990年に専門家会合を招集した。また、この分野における経験交換の拡大を図るため、蒸気および温水の供給を目的とする原子力の利用に関する技術文献も、発行すべく準備が行われている。

エネルギー需給が増大するに伴い、この技術は、そのほかの技術とともに、より徹底した考慮が払われるに値するものに思われる。

