講演

フェニックスから「もんじゅ」へ：高速炉開発と日本の役割

(3) 小型炉市場・4S 開発現状・原子力 GDP モデル

(株)東芝 飯田 式彦

分散電源を必要としている世界の市場と必要とするエネルギーを提供できる小型の原子炉 4S (Super Safe Small and Simple) の開発現状について述べる。また、原子力新興国が求める原子力システムへの要望について、これまでの 4S 開発経験を通して得た知見に基づき評価・整理した。評価にあたり、それらの国を経済形態や技術姿勢を国民 1 人当たりの GDP で分類し、分類ごとに原子力システムへの要望をまとめた(以下、原子力 GDP モデルと呼称)。

I. 海水の淡水化

21世紀は「水」の世紀ともいわれる。日本に暮らすと水は無限にあるように感じられるが、地球上の水で人が生活に使える水は0.8%に限られる。しかも、2025年には世界の人口の40%が深刻な水不足に直面すると予測されている。一方で地球の全水量の96.5%は海が占める。このため海水から淡水を造る技術の重要性がますます増大している。東芝は原子力の電気を使って海水をポンプで昇圧し、逆浸透膜を通して淡水を生産する原子力海水脱塩プラントの開発を(財)電力中央研究所とともに1989年から続けてきた。海水脱塩プラントまたは地下水脱塩プラントは北アフリカや中近東に近々のニーズがあるが、今後世界各地でそのニーズが拡大することは確実である。大口径のパイプラインが中東地域の広大な砂漠をのたうちまわっているとおり、水の輸送コストは高いため、需要地に近接した脱塩プラントに魅力がある。このために、求められている電気出力は最大で50 MWeである。しかし、それによる造水量は日に16万トンにも達する。

この電気を原子炉で供給する場合、電気出力は50 MWe 以下で、原子炉には容易な運転性と高い安全性が求められた。特に、90年代当時、これから原子力を導入する北アフリカや中東の国々は、原子炉の運転員がいなかったため、燃料の交換作業の容易性、定期的な検査・保守の容易性などが切実な課題とされた。

II. 遠隔地の電源

2004年に米国アラスカ州の先住民都市 Galena 市から招聘を受けた。その都市は遠隔地にあり、利用しているディーゼル発電機の燃料や車のガソリンを春夏は船で、秋冬は空から運んでいる。そのため燃料輸送費が高く、住民は最低でも35円/kWh の高い発電コストの負担を余儀なくされている。あわせてディーゼル発電機の排ガスによる環境汚染が課題であった。アラスカにはこうした都市が100箇所以上ある。2009年には、よく似た環境のカナダ北部のコミュニティから相談を受けた。燃料輸送が困難であり、実に発電コストは100円/kWh に達している市があった。アラスカの鉱山会社にも同様なニーズがあり、そこでは50 MWe の出力を求められた。

要請された原子炉の仕様は、燃料を輸送する必要がないこと、少人数で原子炉を運転できること、また原子炉の出力は10 MWe から50 MWe までの小型炉である。また、アラスカ特有の環境意識のためか、廃棄物としての使用済みの燃料を使用後にサイトから持ち出すことを条件とされた。

III. オイルサンドなど非在来型石油抽出

カナダのアルバータ州には非在来型石油と呼ばれるオイルサンドが大量に埋蔵されている。オイルサンドを抽出するには、オイルサンドを含む鉱床を長時間加熱するための高温の水蒸気が必要である。現在、この水蒸気を得るために大量の天然ガスが消費され、排出される炭酸ガスがカナダの環境改善の重荷になっている。これに、環境税を課すかどうか政府で検討されている。2008年、アルバータ州の石油組合が環境保全を目的として、天然ガスに代わる原子炉による高温蒸気を利用するため

Phenix to Monju: FBR Development and Japan Role; (3) Small reactor's market, Current status of 4S development, Nuclear market analysis by GDP capita: Norihiko HANDA. (2010年 10月 4日 受理)

の研究に着手した。

要請された原子炉の仕様は、熱出力140 MWtを2基、蒸気温度310℃以上である。この蒸気温度を得るためには、液体金属冷却炉の利用が適している。ちなみに、140 MWtは電気出力に換算するとほぼ50 MWeに相当する。一方、米国とヨルダンではオイルシェールから石油を抽出するプロジェクトが始動している。この場合350℃以上の蒸気が必要であり、液体金属冷却炉の運転温度に近づく。また、蒸気を必要としている石油会社のニーズは安価な蒸気そのものであり、原子炉の運転にはコミットしない方針としている。そのため、蒸気の供給側で原子炉の運転を行う必要がある。

IV. 水素製造

水素社会の必要性がうたわれて久しいが、その実現には炭酸ガスを排出することなく効率的に水素を製造できる方法の開発が必要である。製造方法の1つは水の電気分解だが、高温の水蒸気を利用できれば、電気分解の効率が改善される。東芝の高温水蒸気電解セルを使うと、10 MWeの電気と450℃の蒸気で3,000 m³/hの水素を発生させることができる。この新しい電解セルは、イットリア安定化ジルコニア(YSZ)を10 μmまで薄膜化した電解質を採用し、水素極と酸素極は、電極上でのイオン化触媒活性、電子導電性およびガス拡散性の観点から構造の工夫をしている。2007年には当時、本方式では世界最大規模の0.13 m³/hの水素製造試験に成功した。

水素製造に適する原子炉に求められる仕様は、450℃を超える高温の蒸気供給である。

V. 多目的利用小型高速炉4Sの開発状況

これまで述べたように、運転が容易で、燃料交換が不要で、メンテナンス量も少なく、高温の蒸気が使え、電気出力換算で50 MWe以下の原子炉が世界のニーズに適する多目的利用の原子炉としてふさわしい。

燃料を交換することなく長期間運転するために、これまでにない新しい技術を必要とした。このため高速中性子により天然ウランまたは劣化ウランを核分裂性物質に転換する技術、炉心の燃焼部位を順次移動させる技術、燃料密度の高い金属燃料技術、稠密に燃料を配置する技術、これらの要素からなる炉心全体を環状の反射体で制御する技術を開発し、実証してきた。そして、実際に炉心を組み立て、2005年には旧日本原子力研究所の高速中性子臨界試験装置で臨界を達成した。

これらの実績を踏まえて、原子炉の米国許認可を取得するため、2007年10月から米国原子力規制委員会(NRC)の事前審査を開始している。同じ時期に大型の高速炉機器試験施設を東芝の磯子エンジニアリングセンターに設置し、NRCが特に関心を示している複数の機器(電磁ポンプ、漏洩検出器付き二重管蒸気発生器)の検証試験を

行っている。この際、NRCの要求する高い品質管理のもとで試験データを取得し、分析する手法を重視した。

また、誰でもが納得しうる設計の妥当性検証のために複数の機関、申請者とは独立した複数の専門家による第三者評価を要求された。日米5機関の専門家による独立評価を実施してこの要求に応じた。

事前審査中、申請者、NRC両方で課題と認識したテーマに設計指針と安全解析とその判断条件がある。Na冷却炉の一般安全指針は、米国では実にクリンチリバー高速増殖炉(CRBRP)の指針に参照利用した1975年以降、1989年に部分的に改定したあと、手がつけられていない。最新の軽水炉で話題とされている過酷事故対策、航空機落下対策、退避計画、静的システムの審査上の位置づけ、デジタル制御関連などは、Na冷却炉指針への反映は行われてこなかった。それは、安全解析の分野でも同様である。事前審査中に申請者自ら、現在の軽水炉審査の状況を反映した新しい指針を提案した。これに対して、NRCからは申請者とは独立した機関による指針の策定を条件とされた。現在、米国原子力学会を主体とする新しいNa冷却炉設計指針を策定するための活動が始まっている。

VI. 原子力 GDP モデルへと展開

現在、追設を含めて原子力発電を導入したいと表明している国は60カ国を超える。このような国々から公式に表明されている導入条件だけではなく、それらの国の潜在的な要望または願望について統一的な視点で分析を行うことにより輸出戦略に対する視野を拡大できよう。

このために、まず国民1人当たりのGDP(国内総生産を人口で割った値)を世界の国々の人々の経済意識を特徴づける指標と仮定する。原子力導入を表明している注目国の個人1人当たりのGDPを第1表に示す。

国民1人当たりのGDPが増大するにつれて、すなわち1人当たりの所得が増えるにつれて、消費意識あるいは工業技術への取組み姿勢が変わることが知られている。それを日本のミネラルウォーターの消費量と市場推移(ガソリンより高価な飲料水を水道水の代わりに購入する消費意識を分析)に着目し、GDPの帯域ごとに、経済形態、消費形態、工業技術への取組み姿勢を分析した研究結果が報告されている⁹⁾。その報告によると、日本を対象にしたこの分析結果は世界の国々にも普遍的に適用しうるとされ、第2表に示す普遍的な分類表を得ている。

例えば、国民1人当たりのGDPが50万円の中国では、生活必需消費から選択消費に移行する境界にあり、技術姿勢は先行技術を真似る段階から自前化を図る段階に移行しつつあることがわかる。UAEの応札に勝利した韓国では、国民1人当たりのGDPは190万円であり、先行技術の自前化を終了し、それを改良、改善する技術

第1表 注目した国の国民1人当たりのGDP

国名	GDP*	国名	GDP*	国名	GDP*	国名	GDP*	国名	GDP*
ノルウェー	94386	シンガポール	38972	ハンガリー	15522	ブラジル	8295	インドネシア	2238
オランダ	52499	日本	38457	ラトビア	14963	アルゼンチン	8171	エジプト	2162
スイス	68433	スペイン	35116	リビア	14479	マレーシア	8118	モンゴル	1975
スウェーデン	52180	イスラエル	28408	リトアニア	14085	ブルガリア	6560	フィリピン	1845
フィンランド	51588	スロベニア	27148	ポーランド	13846	南アフリカ	5684	ヨルダン	1719
アメリカ	47439	カタール	21389	クウェート	13358	中国	5000	ナイジェリア	1402
ベルギー	47289	チェコ	20759	ロシア	11806	イラン	4600	イエメン	1171
オーストラリア	46824	韓国	19136	ベネズエラ	11388	アルジェリア	4588	セネガル	1066
フランス	46037	UAE	18193	トルコ	10479	タイ	4116	シリア	1043
カナダ	45085	スロバキア	17646	メキシコ	10199	チュニジア	3955	ベトナム	1042
ドイツ	44728	エストニア	17532	バハレーン	10025	ウクライナ	3909	パキスタン	1022
イギリス	43733	台湾	16987	ルーマニア	9310	イラク	3007	インド	1017/1900
イタリア	38998	クロアチア	15633	カザフスタン	8718	モロッコ	2827	ガーナ	739

* 国民一人当たりのGDP 出典: IMF World Economic Outlook 2009 を利用して表を作成した
 中東諸国については、石油価格の急騰する直前の1999年GDPを記載した
 中国については、東部地区で原子力発電所の運転ないしは建設している主要ないくつかの省を平均した
 中国全体の平均のひとりあたりのGDPは3259\$である
 インドも州ごとに格差があり平均は1000\$規模であるがデリー準州は1900\$

第2表 国民1人当たりのGDPと消費形態

分類	小分類	経済形態	消費形態	技術姿勢
分類Ⅰ	GDP<50万円	追いつけ型	生活必需消費	先行技術を真似る
分類Ⅱ	50万円<GDP<200万円	追いつけ型	生活必需消費から選択消費へ移行	先行技術を自前化
分類Ⅲ	200万円<GDP<400万円	一部産業でトップランナーに	選択消費	先行技術の改良、改善
分類Ⅳ	GDP~400万円	トップランナーから転落	選択消費の中に新価値観、付加価値重視が芽生える	技術停滞
	GDP>400万円	新産業創出		技術革新

姿勢の段階に移行した。日本は1995年以降、国民1人当たりのGDPは減少しており、トップランナーから転落し、技術姿勢は停滞したと分類される。ただし、消費形態には環境意識など新しい価値観が生まれている。

第2表では技術姿勢までが分析されているが、必ずしも裕福ではない遠隔地などの4S市場を調査した経験は、実は、第2表の分類では、特に分類ⅠやⅡに属す国々に相当する地域の原子力に対する潜在的な要望または願望を直接聞いていたことにもなる。それを第3表に改めて示す。筆者はこれを原子力GDPモデルと呼んでいる。

第3表によると、分類Ⅰ、Ⅱの国々は、安価な建設コスト、建設と運転の実績あるプラント、施設の運転、運転・保守の容易性、許認可支援、使用済み燃料の引き取りを重視している。一方、分類Ⅲ、Ⅳの国々は、安価な建設コストを望みつつ一連の技術的な付加価値(テロ対策、過酷事故対策、単純性、多様性、廃棄物処理)を重視している。また、技術の自前化については、近いうちに分類ⅠからⅡに移行する国の経済姿勢、技術姿勢の必

然でもある。

国民1人当たりのGDPに応じて、それらの国が求める潜在的な要望または願望が浮き彫りにされた。願望している原子炉とその導入の方式、範囲はGDPレベルで異なるのである。

Ⅶ. おわりに

最近、米国で見直されている小型原子炉モジュールによる中・大型発電所は、モジュール炉の特徴を生かした基幹電源の可能性として、米国の一部には期待がある。それが導入されるためには単基の大型原子炉で構成した大型発電所と比べてコストで優位でなければならない。しかし、ひとたび、世界に目を転じれば、小型のしかも多目的なエネルギーニーズが数多くの地域にある。地域ごとの要求は明確であり、小型Na冷却高速炉4Sが要求に対応すべく開発された。コストは既存のエネルギー施設のコストに比べて優位であればよい。それは例えば、遠隔地の電源であれば100円/kWhを十分に下回れば魅力と映る。

第3表 原子力 GDP モデル

分類	小分類	要望、願望
分類Ⅰ	GDP<50万円	安価な建設コスト 建設・運転実績
分類Ⅱ	50万円<GDP < 200万円	施設の運転 運転・保守の容易性 技術の模倣から自前化 許認可支援 使用済み燃料の引き取り 燃料供給
分類Ⅲ	200万円<GDP< 400万円	安価な建設コスト 付加価値
分類Ⅳ	GDP~400万円	テロ対策 過酷事故対策 発電性能向上
	GDP>400万円	単純性 多様性 廃棄物処理

一方、別の観点からの要求がある。始めて原子炉を運用する必ずしも裕福ではないそれらの地域からは、運転委託、容易な運転性、簡素な保守、燃料交換なし、使用済み燃料の引き取り、許認可支援、将来大きな産業へ発展させるための協力が要望された。

これらの要望のセットはもっと普遍化できるので、世界の国々を国民1人当たりのGDPを指標にして分類し、原子力GDPモデルを作成した。それを使って各国が願望している原子炉とその導入の方式、範囲はGDPレベルで異なることを示した。

—参考資料—

- 1) 飯田式彦, “原子力輸出の際の一指針”, 季報エネルギー総合工学, 33[1], 21(2010).

著者紹介

飯田式彦(はんだ・のりひこ)

株東芝 原子力事業部
(専門分野/関心分野)高速炉システム, 原子力安全