



目次

1. パキスタンの原子力開発に関する動向
2. 小型原子炉開発に関する動向

1. パキスタンの原子力開発に関する動向

(1) 中国のパキスタンへの原子炉輸出問題

① パキスタンの商業用原子力開発の経緯

パキスタンの最初の原子炉は、1971年に稼働したカナダ製の天然ウランを燃料とする加圧型重水炉(PHWR)で出力は125MWe、カラチの西約15マイル(24km)に位置し、KANUPP(Karachi Nuclear Power Plant)と呼ばれている。その後、中国が自主開発した加圧水型軽水炉(PWR)で、出力300MWeの泰山1号機と同じものをパキスタンのチャシュマ(Chashma)に建設する協定を中国と1990年に締結し、1993年から建設を開始し、チャシュマ1号機は2000年に運開した。2000年にも同様な協定を締結し、2005年12月にチャシュマ2号機(出力300MWe)の建設(建設費は860百万ドルで、中国が350百万ドルを融資)が開始され、2011年運開の予定で現在も建設が行われている。稼働中の2基の原子炉はIAEAの保証措置下であり、チャシュマ2号機についても既にIAEAと保証措置協定を結んでいる。¹⁾

この間、2004年に中国は原子力供給国グループ(Nuclear Suppliers Group: NSG、カナダより輸入したPHWRを用いて生産したプルトニウムを使用してインドが核兵器を開発し1974年に核実験を行ったことに対応して、核拡散を防ぐために作られた原子力資材等の輸出規制を実行するための原子力技術等の保有国の集まり)に加盟を申請したが、核不拡散条約へ加盟していないパキスタンへの原子炉輸出に

ついて、NSG の規則に反するため問題となった。これに対して中国は、パキスタンへの原子炉の輸出は 2000 年に締結した協定に基づくもので加盟申請以前に約束したものであり規則に抵触しないと反論し、加盟は認められた。NSG 加盟以降もチャシュマ 1 号機の核燃料は中国が供給している。²⁾

パキスタンは、2005 年にエネルギー安全保障計画を策定し、2030 年までに発電容量を 160GWe 以上に大幅に拡大(2006 年の発電容量は約 20GWe)することを目標に掲げ、その計画の中で、原子力については、2015 年までに 900MWe、2020 年までに 1500MWe、2030 年には 8800MWe としている。建設する原子炉としては、300MWe の中国製 PWR を 4 基、1000MWe(中国製の CNP1000 を予定)を 7 基予定していたが、大型炉については地方の電力事情を考慮して小型炉の建設を計画している。また、2006 年にパキスタン原子力委員会は商業用原子炉への核燃料供給のために、軍事用と商業用の核燃料施設の分離を準備していると発表した。新施設の建設費は 12 億ドルで、転換施設、濃縮施設、燃料加工施設の全てが IAEA の保証措置下に入り、濃縮施設は、2013 年頃までに 150tSWU/y、2030 年までにさらに 150tSWU/y を増設する予定であり、8800MWe の需要の 3 分の 1 を供給するとしている。¹⁾

転換施設と核燃料加工施設については現在建設中で、濃縮工場については 2010 年 1 月 21 日、政府が建設を承認した(建設費は 142.4 億パキスタンルピー(約 1.67 億ドル))。これ等の施設の立地場所は、チャシュマ原子力発電所の立地場所であるパンジャブ州ミアンワリ県クンディアン(Kundian, Mianwali district, Punjab province、インダス川流域のチャシュマ堰止湖の湖岸)で、このほかに、同地区に商業用再処理施設が建設されているとの情報もある。^{3),4),5),6)}

また、ウランの生産についても、2015 年までに需要の約 3 分の 1 に当たる 350tU₃O₈/y(297tU/y)を目標にしている。(鉱山は、パキスタン中央部の Bannu 盆地 と Suleman 地域。)¹⁾

②中国との新たな原子炉 2 基の建設協力協定

このような計画の中で、2008 年 10 月、パキスタン同様に NPT 非加盟国である隣国のインドが米国と原子力平和利用協力協定を結んだことに対抗して、2008 年 10 月に中国と 2 基の原子炉(チャシュマ 3 号機と 4 号機、出力は各々 340MWe)建設に関する協力協定を締結した。2009 年 4 月には、中国の Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute (SNERDI)と設計契約を締結し、2010 年 3 月には、パキスタン政府は、「チャシュマ 3 号機と 4 号機の建設について、中国が建設費 19.12 億ドルの 82%を 3 件の 20 年間の低金利融資で貸与することで合意した」と発表した。2010 年 6 月には、中国最大の国営原子力総合企業の中国核

工業集团公司(CNNC)と建設契約を結んだことが報じられた。¹⁾

このような中国とパキスタンの動きに対して、米国は懸念を表明していた。そもそも NPT 非加盟国であるインドへの原子力機材等の輸出について、NSG の規則の除外を政治的圧力で 2008 年 9 月の NSG 会合で承認させたのは米国であり、NSG 加盟国である中国のパキスタンへの原子炉輸出に対して反対を唱えるには弱い立場にあるが、ブッシュ政権時代は、インドの核不拡散の実績に対してパキスタンのカーン博士のイラン、北朝鮮、リビアへの濃縮技術や核兵器設計情報の漏えい問題を上げ、中国のパキスタンへの原子炉輸出に関して強く牽制していた。しかしながら、オバマ政権になり、パキスタンからのインドと同様の原子力平和利用協力協定締結の要請に対してブッシュ政権同様拒否の態度を継続しているが、中国へのけん制は穏やかになっている。⁷⁾

2010 年 6 月 21 日から 25 日までの NSG 年會が近付いてきた 5 月 10 日に、米国の国務副長官 James Steinberg は、「米国政府は中国のパキスタンでの 2 基の原子炉建設計画について注意深く調査しているが、まだ、最終判断には至っていない」と述べ、⁸⁾2010 年 5 月 24 日には、オバマ政権は、中国とパキスタンの取り決めが NSG(46 ヶ国)のメンバーとしての中国の義務に違反するものでなければ、米国政府は中国がパキスタンに 2 基の原子炉を建設することを邪魔はしないだろうとの態度をほのめかした。⁷⁾

カーネギー国際平和財団(Carnegie Endowment for International Peace)の原子力問題のアナリスト Mark Hibbs は以下のように述べている。⁹⁾
“オバマ政権の選択肢は 2 つ。その取引に反対し、中国に NSG から去るように要求するか、いやいやながら中国の輸出を受け入れるか。ヒラリー国務長官の中国との戦略対話のための北京での 3 日間の中国首脳との会談では強く後者に傾いている。米国は、今中国と多くの問題を共有している。イランへの安全保障理事会での制裁決議への中国の協力、北朝鮮への圧力に関する中国の協力、元の切り上げ問題等。最も重要なのは 2008 年の米国自身の NSG の規則破り。中国はその時阻止することができたが、米国とその同盟国の圧力に便宜を図った。中国はいま米国からの見返りを期待している。”

中国政府のパキスタンへの原子炉輸出に対する見解は、チャシュマ 3 号機と 4 号機の輸出は、2004 年の NSG 加盟前にパキスタンと結んだ原子炉建設に関する協定につながるもので NSG の承認は必要ないとしていて、IAEA の保証措置下で商業的平和利用の目的で建設するもので問題はないと答えている。¹⁰⁾

2010 年 6 月 14 日、米政府高官は、2004 年以前の協定の範囲を超えた今回の原子炉建設プロジェクトは NSG の承認を必要とすると述べたが、国務省の報道官 Gordon DuGuid は、「米国政府は、中国が核不拡散の義務に矛盾しない方法でパ

キスタンに協力するよう期待していることを再度中国政府に伝えた。」とトーンダウンしている。¹¹⁾

ニュージーランドのクライストチャーチで開催された 2010 年 NSG 年会の 6 月 24 日、25 日の全体会議では、予想に反して、中国はパキスタンへの原子炉輸出に関して正式な報告をせず、この問題に関して発言した国はなかったと報じられている。^{2),12)}

5 月の NPT Review Conference で多くの国が NSG のインドに対する輸出規制の除外について警告を発し、将来、非核保有国が NPT から去るのを助長する恐れがあると発言していて、今回のパキスタンへの原子炉輸出がこのまま実施に移されればさらに影響は大きくなることであろう。¹³⁾

NSG の会合後の 2010 年 7 月 8 日、中国を訪問したザルダリ大統領は、温家宝首相と会談し、両首脳は堅い協力関係を確認している。¹⁴⁾また、2010 年 7 月 18 日、パキスタンを訪問した米国のクリントン国務長官は、翌日のパキスタンのシャー・マフムード・クレス(Shah Mehmood Qureshi)外相との共同記者会見(イスラマバードで行われた)で、米国がインドへは原子力技術を提供するのになぜパキスタンには提供しないのかと問われたのに対して、その理由として、カーン博士のイラン、北朝鮮、リビアへの核兵器関連技術の密輸に触れてパキスタンの核兵器関連技術の輸出管理への国際的な心配を上げ、NSG の会合でも取り上げられたことを述べるとともに、国連の軍縮会議で議論されてきた兵器用核分裂性物質生産禁止条約(カットオフ条約)にパキスタンが唯一反対していることについても言及した。しかし、インドとの原子力平和利用協力協定を締結するまでに何年にもわたって行ったインドとの徹底的な議論と同様な議論をパキスタンとも始めているとも述べていて今後の展開に含みを持たせているが、当面は、米国としては、パキスタンのエネルギー危機への支援策として、既存の発電設備の修復、送配電設備の修理、エネルギー管理の改善、ダムの開発、再生可能エネルギープロジェクトの立ち上げなどを上げていて、民生用原子力協力については長期的な課題との姿勢を崩していない。しかしパキスタンとしては、オバマ政権に対して原子力平和利用協力協定の締結を今後も強く要求していく模様で、2010 年 7 月 28 日からワシントンで開催される米国とパキスタンの閣僚レベルでの初めての戦略対話における要求項目の一つとして上げている。^{15),16)}

米国政府の最優先課題は、テロ対策と経済問題であり、中国との経済関係及びアフガニスタン対策におけるパキスタンとの協力関係が続く限り、この問題が外交問題に発展する可能性は少ないと思われる。

(2)パキスタンの電力事情

2010年7月19日のクリントン国務長官との共同記者会見で、クレシ外相は、中国との原子炉2基の建設に関する協力協定について、パキスタンが直面しているエネルギー危機について言及しその必要性を弁護した。停電は、都市部でも6時間から7時間、地方では10時間から12時間に及ぶとのことである。¹⁵⁾

パキスタンは人口1億6500万人で、GDPは年間約5%の伸びを示していて、電力不足が深刻化している。地元メディアの伝えるところによれば、現在の発電設備容量は19GWeで電力需要の14.5GWeを十分に満たしているが問題は実際利用できる発電設備容量は10.2GWeしかないことであり、その理由としていくつかの要因を上げている。一つは、軍や政府機関は発電を担当する国営電力会社等へ電力料金を支払わないため、電力会社は燃料の天然ガスや石油の輸入が十分に行えず、輸入した高価な発電所を稼働できないとのこと。また、非効率的な送配電システム(送電線、トランス、接続不良)による損失は10%に上り、工場の機械設備、オフィス及び家庭の電気器具は恐ろしいほどエネルギー効率の悪いものが使われていて、さらには金持ちも貧乏人も電気の窃盗(電力会社の従業員が賄賂を受け取り電力積算計をバイパスしたり、電力積算計を改ざんしたりしている)を行っていて、その電力量はチャシュマの原子炉4基分を越えると伝えている。²⁾

(3)パキスタンの最近の核兵器開発動向

パキスタンは60~100発の核爆弾及び核弾頭を所有していると推定されているが、さらに、水素爆弾の開発及び小型で運搬しやすく強力な破壊量を持つプルトニウム原子爆弾の開発を現在も進めている。⁶⁾

プルトニウムの生産用の原子炉としては、チャシュマ原子力発電所の東約80kmのクシャブ(Khushab、ジュラム川沿い)に、1988年に50MWtのPHWRが運転を開始し、2002年頃からさらに大型のPHWRの建設を開始して、2009年末に運転を開始した模様で、2010年3月、衛星写真によってその稼働が確認されている。さらに、2006年、3基目の同様なPHWRの建設が開始され、現在建設中である。燃料は国内産のウランを使用している模様。^{1),17)}

使用済み燃料からのプルトニウムの抽出については、ラーワルピンディー近くのパキスタン科学技術研究所で行われていて、2002年に確認された施設に加えて新しい施設が2009年に確認されている。⁶⁾

参考資料

- 1) “Nuclear Power in Pakistan”, WNA, June 29, 2010
<http://www.world-nuclear.org/info/inf108.html>

- 2) "Nuclear energy the answer?", DAWN.com, June 29, 2010
<http://www.dawn.com/wps/wcm/connect/dawn-content-library/dawn/the-newspaper/editorial/nuclear-energy-the-answer-960>
- 3) "ECNEC approves N-fuel enrichment plant in Mianwali", Daily Times, January 22, 2010
http://www.dailytimes.com.pk/default.asp?page=2010%5C01%5C22%5Cstory_22-1-2010_pg7_12
- 4) Pakistan Atomic Energy Commission
<http://115.186.133.3/pcportal/psdp/PSDP%202009-10/AtomicEnergy.pdf>
- 5) "Pakistan to set up 2nd uranium enrichment plant", Pakistan Defence, August 23, 2007
<http://www.defence.pk/forums/wmd-missiles/6976-pakistan-set-up-2nd-uranium-enrichment-plant.html>
- 6) "Pakistan Expanding Plutonium Separation Facility Near Rawalpindi", ISIS, May 19, 2009
http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/PakistanExpandingNewLabs_19May2009.pdf
- 7) "U.S. Could Accept China-Pakistan Reactor Deal", Global Security Newswire, May 25, 2010
http://www.globalsecuritynewswire.org/gsn/nw_20100525_9132.php
- 8) "US studying China-Pakistan nuclear deal", AFP, May 10, 2010
http://www.google.com/hostednews/afp/article/ALeqM5iH6V221uDXi_9pOIorNd17PYnSvQ
- 9) "Chinese nuclear reactor to Pakistan would breach int protocol", Press Trust of India, June 11, 2010
<http://economictimes.indiatimes.com/news/politics/nation/Chinese-nuclear-reactor-to-Pakistan-would-breach-int-protocol/articleshow/6036465.cms>

- 10) “China says Pakistan nuclear deal 'peaceful'”, BBC News, June 17, 2010
http://news.bbc.co.uk/2/hi/world/south_asia/10340642.stm
- 11) “Washington objects to China-Pakistan nuclear deal”, Washington Post, June 14, 2010
<http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2010/06/14/AR2010061404680.html>
- 12) “Nuke deal with China in tandem with IAEA rules: Pak”, Times of India, June 28, 2010
<http://timesofindia.indiatimes.com/World/Pakistan/Nuke-deal-with-China-in-tandem-with-IAEA-rules-Pak/articleshow/6102396.cms>
- 13) “China, Pakistan, and the Nuclear Suppliers Group”, Carnegie Endowment for International Peace, June 17, 2010
<http://www.carnegieendowment.org/publications/index.cfm?fa=view&id=41027>
- 14) “China, Pakistan agree to cement strategic cooperative partnership”, Xinhua, July 8, 2010
http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-07/08/c_13390690.htm
- 15) “Pakistan defends civilian nuclear cooperation with China”, Xinhua, July 20, 2010
<http://english.peopledaily.com.cn/90001/90777/90851/7072042.html>
- 16) “US prepares for Civil Nuclear deal with Pakistan”, Pakistan Patriot, July 23, 2010
<http://www.pakistanpatriot.com/?p=32000>
- 17) “Steam Emitted From Second Khushab Reactor Cooling Towers; Pakistan May Have Started Operating Second Reactor”, ISIS, March 24, 2010
http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Second_Kushab_Reactor_24Mar2010.pdf

2. 小型原子炉開発に関する動向

1) 米国の開発動向

小型原子炉の開発は、古くは潜水艦、航空機、宇宙船用の動力炉として 1950 年代から開発が始まり、1959 年には最初の原子力潜水艦が進水している。原子力潜水艦の原子炉は、通常は熱出力数十 MW の原子炉でほとんどが加圧水型軽水炉であるが、ロシア海軍の一部は鉛ビスマス冷却材を用いる高速炉を使用している。

宇宙船用の超小型原子炉の開発は、米国で 1950 年代遅くから開発が始まり、1960 年代にかけて Systems Nuclear Auxiliary Power プログラムとして開発が行われた。最後に開発された SNAP10 原子炉は機器と遮蔽を含めて重量は 430kg より軽く、熱出力 40kW で 10000 時間運転された。(目標は、最低 500We で 1 年間もしくはそれ以上発電すること。) 電気への変換は熱電変換方式 (PbTe 系などの熱電変換素子を使用する) で、燃料は濃縮ウラン、減速材は水素化ジルコニウム、冷却材は NaK、燃料配置は板状配列、ベリリウムの反射体を用いていた。最終的には、1965 年 4 月 3 日、ロケットが打ち上げられ 926km の地球軌道に入り、600We で 43 日間発電を行ったが、衛星の電気系統の故障のため原子炉は停止された。現在も地球軌道上をまわっているとのこと。¹⁾

2000 年代になり、送電設備が整っていない開発途上国での電力源、遠隔地での家庭用電力源、未開の鉱山での電力源、タールサンドから石油抽出の熱源、軍事施設の自立電力源、海水の淡水化用熱源など多用途の小型炉の開発が行われた。

IAEA の定義では、300MWe 未満を小型炉、300MWe~700MWe を中型炉に分類していて、DOE のチュー長官の小型炉の定義もほぼ同じである。^{2),3)}

IAEA の評価では、2040 年までに小型炉から中型炉が 500 基から 1000 基建設される可能性があるとされており、将来有望な市場と考えられている。⁴⁾

(1) 開発状況

以下に、米国における企業及び研究機関の小型炉開発の状況を示す。

①ハイペリオン・パワー・ジェネレーション (Hyperion Power Generation)

投資会社 Altria Group が 10 百万ドルを出資して 2007 年 10 月に設立したベンチャー企業で、2008 年 11 月にセンセーショナルな発表を行い、小型炉への注目を集めるきっかけを作った。⁵⁾ この時の発表では、25MWe の小型炉 (冷却材に鉛ビスマス、燃料にはウラン窒化物を用いる高速炉で、ロス・アラモス国立研究所で開発された技術を技術移転したもの) を原子炉価格 25 百万ドル (2010 年 5 月の情報では、原子炉本体が 50 百万ドル、発電設備等が 50 百万ドル^{6),7)}) で販売し、既に 100 基分の確実な注文を受けていて (2010 年 6 月 14 日の情報では 150 基分で鉱山会社や通信会社からの購入依頼⁸⁾)、2013 年から 2023 年で 3 つの工場を建設し 4000 基 (原子

炉本体の寸法は、直径 1.5m、長さ 2.5m で重量は 50t 未満)を生産するというもので、ルーマニアの TES グループ(中央ヨーロッパでエネルギープロジェクト開発を行っている投資会社)からは 6 基分の注文の意向を示すサイン入りのレターをもらっているとのことであった。

2010 年 6 月 14 日には、米国の独立系電力会社 AEHI(Alternate Energy Holdings, Inc:米国のクリーンエネルギー開発会社で、アイダホ州の Payette 郡に原子力発電所を建設することを提案している)と世界市場での小型炉の許認可、建設、販売に関する合併事業を開始する覚書に調印している。⁸⁾

予定では、2013 年の下期に最初の 1 基目を出荷することになっているが、NRC への設計承認申請の予定は明らかにされていない。⁹⁾

②Babcock & Wilcox(B&W)

約 50 年間にわたって米国海軍の艦船の原子炉を製造してきた B&W は¹⁰⁾、2009 年 6 月には、出力 125MWe(400MWt)の小型炉(先進型 PWR)mPower の開発について発表し、コストは 5000 ドル/kWe 以下になると述べた。¹¹⁾2010 年 7 月時点での建設コスト目標は 750 百万ドル(6000ドル/kWe)である。¹²⁾

第 3 世代の先進小型炉 mPower の特徴は、原子炉圧力容器内に蒸気発生用の熱交換器を内蔵し、一次冷却水配管をなくすことで冷却水喪失事故を防ぎ、原子炉停止時は自然循環で炉心を冷却できる受動的な安全システムを導入し安全性を向上させていることである。原子炉本体を地下に埋設し、地震に対しても安全性を高めている。¹³⁾

また、小型のため工場で大量生産して建設サイトに運搬(mPower の原子炉圧力容器の大きさは直径約 3.7m、高さ約 22.9m で鉄道かトラックで輸送可能¹⁴⁾)することで、建設コスト上での大型プラントに対する小規模プラントの欠点を補える可能性がある。大型炉と同程度の建設コストであれば、小型炉の方が初期投資が少なく、需要に応じて増設しモジュラー化(米国では小型モジュラー炉、SMR(Small Modular Reactor)と呼ばれている)できることから、米国の小規模電力会社、開発途上国、大規模工場施設等には適していると考えられている。

2009 年 8 月には、米国最大規模の電力会社 TVA(Tennessee Valley Authority:テネシー川流域開発公社)と mPower の開発について支援協定を結び、TVA はオークリッジ周辺に小型炉を建設するためのフェージビリティ調査に協力することに合意している。¹⁵⁾

2010 年 7 月 14 日には、世界的なエンジニアリング会社の Bechtel と mPower の設計、許認可、市場展開について正式な協力関係に入ったことを発表している。¹⁶⁾

B&W は、mPower の開発に既に数千万ドルを投資していて、2010 年 7 月 27 日に、バージニア州ベッドフォード郡の New London Business and Technology

Centerに建設中の Center for Advanced Engineering and Research に mPower の実物台のモックアップ試験設備(熱源は電気ヒーター)を設置することを公表した。1年目の投資額は7.6百万ドルで、公的補助も含めて3年間に30百万ドルを投資する。試験設備は2011年の第1四半期に完成し、2012年第4四半期に予定しているNRCへの設計承認申請(既に事前申請段階に入っている)のための試験データを取得する予定である。¹⁴⁾

現在最初の1基目の原子炉設置場所としては、オークリッジが有力視されていて、2020年までに稼働することを目標としている。¹²⁾

③NuScale Power

会社設立は2007年で、2008年9月に投資会社CMEA Capitalから2.65百万ドルの資金提供を受け本格的な活動を開始した。開発している原子炉は、出力45MWe(150MWt)の小型のPWRでB&WのmPowerと同様に原子炉圧力容器内に蒸気発生用の熱交換器を内蔵し、受動的安全システムを取り入れた第3世代の先進小型炉である。原子炉圧力容器の大きさは直径2.7m、高さ13.7mで出力が低い分mPowerの半分程度で、発電単価は、従来の大型原子炉と同等の6~9セント/kWhが可能としている。^{5),17)}

小型炉の技術は、DOEの小型炉開発基金を利用して2000年から2003年まで行われたオレゴン州立大学とアイダホ国立研究所(Idaho National Environment & Engineering Laboratory (INEEL))の共同研究開発の成果をもとに、その後オレゴン州立大学が独自に研究開発を継続して得られた技術を継承したものである。2007年にNuScaleは、オレゴン州立大学から、開発した技術の排他的使用権を与えられるとともに、オレゴン州立大学が研究開発のために設置した3分の1スケールの原子炉のモックアップ試験設備(熱源は電気ヒーター)継続使用権を与えられている。2008年4月には、エンジニアリング会社のKiewit Constructorsと小型炉の開発に関する協力の覚書を結び、Kiewitは小型炉の製造及び建設のための計画を策定中である。¹⁸⁾

NRCへの設計承認申請は2012年第2四半期の予定(既に事前申請中)で、2018年までには最初の原子炉の完成を目指している。¹⁹⁾

④東芝

東芝と電力中央研究所が共同で開発してきた4S炉(Super-Safe, Small and Simple Reactor)は、ナトリウム冷却の小型高速炉で、注目を集めたのは、2004年12月14日、米国のアラスカ州ガレナ(Galena)が、4S炉の実証のための東芝の無償での10MWeの小型原子炉の建設設置の提案を受け入れたニュースである。人口約700人のガレナは、外部からの送電供給がなく、また、アクセス道路がないため、

ディーゼル発電機の燃料を空輸もしくは夏の間ユーコン川を利用して船で運んでいる。このため発電コストが非常に高く、東芝の無償での原子炉設置により町は運転費を払うだけで済むため、他の発電設備を設置するより安く済むことから東芝の提案を受け入れたとのことである。²⁰⁾

10MWe の 4S 炉は、20%未満の金属濃縮ウラン燃料(ウランとジルコニウムの合金燃料を金属で被覆したもの)または 24%含有の金属ウラン・プルトニウム燃料(ウランとプルトニウムとジルコニウムの合金燃料を金属で被覆したもの)を用い、炉心を取り囲む金属の中性子反射体を徐々に移動するとともに炉心中央の中性子吸収体を稼働 14 年後に除去することで 30 年間燃料を交換せずに臨界を維持できる設計となっている(50MWe タイプは、燃料交換サイクルは 10 年間)。また、冷却材のナトリウムの温度は 510°Cと高温を達成でき水素製造用の熱源としても利用可能となっている。安全性については、小型の PWR と同様に原子炉圧力容器内に熱交換器を内蔵し、停止した場合でも自然通風により原子炉を冷却できるような受動的な安全システムを導入している。また、運転時の冷却材のナトリウムの循環は可動部のない電磁ポンプを採用し保守を必要とせず長期間の運転に対応できるようにしている。さらに原子炉は地下に埋設し、テロなどの破壊活動に対しても高い抵抗性を有している。ガレナでの 10MWe の 4S 炉の建設・運転許可申請は既に事前申請段階で、2010 年 10 月に本申請(当初 2009 年を予定していたが、NRC が現在申請中の大型炉の審査で対応できず遅れている)を行う予定である。建設コストの目標は 2500 ドル/kW で、10MWe タイプの発電コストは 5~7 セント/kWh が可能としている。東芝は、遠隔地の鉱山の発電設備、淡水化設備としての需要を見込むとともに、金属ナトリウムを冷却材に使用することで達成できる約 500°Cの高温を利用した水素製造設備として世界市場への展開を計画していて、発電設備としてよりは水素製造設備としての販売を期待している。^{21),22)}

⑤SANDIA 国立研究所

2009 年 8 月、SANDIA 国立研究所が小型炉(冷却材に Na を用いる高速炉)の開発計画を発表した。出力は 100~300MWt で大型炉の建設期間が 7 年間であるのに対して 2 年間ですみ、年間 50 基の原子炉を大量生産方式で製造し、目標とする建設コストは 1500ドル/kW、発電コストは 5 セント/kWh を目標としている。発電は超臨界炭酸ガスタービンを用いて高効率を目指していて、商業化のための産業界のパートナーを求めている。^{23),24)}

⑥General Atomics (GA)

2010 年 2 月 22 日、General Atomics (GA)社が、軽水炉の使用済燃料を燃料として運転できる小型炉を 12 年間で開発する計画を発表した。この小型炉は、冷却材

にヘリウムを用いる高速中性子高温ガス炉 (helium-cooled fast-neutron high-temperature reactor、原子炉出口温度約 850°C) で、Energy Multiplier Module(EM2)と呼ばれ、出力は 240MWe(500MWt)で、軽水炉の使用済燃料を燃料に利用することが可能としている。軽水炉の使用済み燃料のリサイクルの方法としては、最初の炉心は 12%の濃縮ウラン約 22.2t と軽水炉の使用済み燃料(または劣化ウラン)20.4t からなり、30 年間燃料交換なしで運転後、発生する使用済み燃料は核分裂生成物(約 4.1t)を分離した後(残りは約 38.5t で、ウラン、プルトニウム、アメリカシウム、キュリウム等を含む)、軽水炉の使用済み燃料(または劣化ウラン)約 4.1t を加えて次の炉心の燃料とする。これを繰り返すことで、現在米国が保管している軽水炉使用済み燃料を削減できるとしている。また、原子炉圧力容器の直径は約 5m、高さは 18m で鉄道またはトラックで運搬可能で、850°Cの高い運転温度は発電効率が高く、発電以外にも石油精製など熱源としての利用も可能である。目標としては、先進型の軽水炉に比べて建設コストと運転コストの 30%低減を掲げていて、今後数年以内に炉の基本設計を終えて燃料製造の実証を行い、5 年以内に NRC の設計認証を申請し、2022 年までに炉の製造販売許可の取得及び燃料製造を開始する計画を持っている。^{25),26)}

高温での運転に耐えられる材料開発や、使用済み燃料の再処理など技術的課題もあるが、問題は開発費 17 億ドルの確保とされている。²⁵⁾頼みの綱は DOE で、チューー長官は NGNP(Next Generation Nuclear Plant)として、化石燃料に代わる熱源としての高温ガス炉に期待を寄せていて、発電以外に水素製造、石油及びバイオ燃料の精製、海水の淡水化、肥料の生産、オイルシェルからの石油抽出等への利用で原子力をより幅広い産業(輸送部門、化学工業部門等)へ適用し、複数の産業工程を統合することで、輸入化石燃料を削減するとともに、地球温暖化ガスの排出を削減し、数万人の雇用を生み出すとチューー長官は述べている。²⁷⁾また、2010 年 2 月 1 日に発表になった 2011 年会計年度予算でも NGNP に対して 195 百万ドルの予算を計上している。²⁸⁾2010 年会計年度においては、NGNP の概念設計及び計画策定を行う総額約 40 百万ドルの契約を Westinghouse チーム(Pebble Bed Modular Reactor 社、Shaw Environmental & Infrastructure 社、東芝、斗山、Technology Insights 社、M-Tech Industrial (PTY)社を含む)と General Atomics チーム(General Dynamics Electric Boat Division、URS Washington Division、韓国原子力研究所(KAERI)、富士電機システムを含む)の 2 チームと結び、検討を進めている。最近の発表では、建設・運転の許可申請は 2013 年で 2017 年の建設開始、2021 年から運転開始を目指している。²⁹⁾これ等の技術開発の成果を反映できれば EM2 の開発も加速されることになるだろう。

⑦米国航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)

将来の月面基地や火星基地用の動力源として使用する目的で、2006年に、新たな超小型原子力発電システムの開発が始まった。開発は、DOEの協力のもとに超小型原子力発電システム(FSP: Fission Surface Power)の設計研究が行われ、目標性能としては電気出力40kWe、設計寿命8年で、完成目標は2020年とされた。高速炉(燃料としてはウラン酸化物、ウラン窒化物、ウランジルコニウム合金)から熱中性子炉(燃料としてはウラン水素化ジルコニウム合金)まで検討された。発電方式についても、従来のタービン駆動による発電、スターリングエンジン、PbTe系の熱電変換素子を用いた熱電変換方式が検討された。³⁰⁾

現在は、原子炉の冷却材としてNaKを用いる想定で、電気加熱による模擬熱源(熱媒体はNaK)とスターリングエンジンを組み合わせた発電試験を実施している。試験では、定常的に2.3kWeの発電に成功し実用化の見込みを得たと報告されている。その他、原子炉の冷却システムの開発や月面での厳しい環境(宇宙線による高線量下、大きな温度変化(昼は100°C以上、夜は-100°C))での機器材料の劣化などに関する試験を行っている。予定では、これらの要素試験は2014年までに終了し、2020年までに全体システムを完成させる予定である。NASAは月面基地の建設は2020年代の初め、火星基地は2030年代に建設することを目標に掲げている。月面基地の初期段階での必要電力は25~100kWe、最終的には1MWeが必要と推定している。³¹⁾

⑧その他³²⁾

現在、米国の原子力安全規制委員会(NRC)へ小型炉の設計承認申請を意思表示している企業は、上記に述べた、Hyperion Power Generation(出力25MWeの鉛ビスマス冷却高速炉)、東芝(出力10MWeのナトリウム冷却高速炉)、B&W(125MWeのPWR、mPower)、NuScale Power(出力45MWeのPWR)以外では、南アフリカのPBMRで、出力165MWeのヘリウム冷却高温ガス炉を2013年会計年度に設計承認申請を提出する予定となっているが、PBMRのプロジェクトは資金提供をしている南アフリカ政府の財政難のため、大幅な縮小または廃止となる状況にある。(6)南アフリカの開発動向を参照のこと)

また、中型炉では、GE Hitachiが出力331MWeのナトリウム冷却高速炉PRISM(Power Reactor Innovative Small Module)を2012年第1四半期に、Westinghouseが出力335MWeのPWR(B&WのmPowerやNuScale Powerの小型PWRと同様、原子炉圧力容器内に熱交換器を内蔵している)を2012年の第3四半期にNRCへ設計承認申請を行う意思表示をしている。

(2)今後の動向

今後の小型炉の商業化ペースを左右するのは、NRC による設計承認スケジュール次第と言われている。現在 NRC は、原子カルネサンスにより大型軽水炉の建設・運転承認申請の審査(2010年6月21日時点で申請は26基、2011年までで31基と予想)で人員不足であり、しかも、新たな安全システムや、高速炉に対する安全指針を整備しなければならず、また、高速炉に関する経験豊かな人材も不足していると言われている。特にハイペリオン・パワー・ジェネレーションの提案している小型高速炉は冷却材に鉛ビスマスを使用し燃料はウラン窒化物燃料(20%未満)で米国ではほとんど実績がないため安全審査には通常より多くの時間を要すると思われる。

また、もう一つの要素として、オバマ政権の開発支援が挙げられる。米国エネルギー省(DOE)は、2011年会計年度予算で、小型炉(SMR)のための新規予算39百万ドルを要求していて、産業界と共同して NRC から小型炉の設計認証を取得したいとしている。また、予算審議中の議会では、オハイオ州選出の共和党上院議員 George Voinovich が SMR の研究開発に10年間で毎年100百万ドルを拠出する法案を提出するとともに、2011年会計年度予算に16百万ドルの追加を後押ししている。さらに、DOE は高温ガス炉の開発については力を入れており、2011年会計年度予算で195百万ドルを要求している。³³⁾

最近の評価では金融コストを含めた大型原子炉の建設コストは100億ドル前後に膨らんでいて、米国政府の債務保証が得られなければ資金の調達が非常に困難な状況にあり、初期投資が少なくて済む小型炉が有望視されており、従来技術の延長で実用化が可能な小型のPWRは10年以内に商業化される可能性が高い。しかし、高速炉と高温ガス炉については NRC の安全審査に手間取ることが予想され、商業化にはさらに時間がかかると思われる。

2)ロシアの開発動向

(1)フローティング原子力発電所^{34),35),36)}

ロシアは、原子力砕氷船で培った技術を利用して、小型の PWR を可動式の鉄製浮体構造物に設置するフローティング原子力発電所を開発中で、目的は、シベリアなどの遠隔都市、北極海での石油と天然ガスの資源開発基地等での電力や熱供給源として利用することである。第1号基は2009年5月から Санкт・ペテルブルグの造船所で製造が始まっていて(契約額は99.8億ルーブル(約3.3億ドル))、2010年6月30日に進水し、鉄製浮体構造物(排水量21500t、長さ144m、幅30m、高さ10m(喫水5.6m))に出力35MWe(150MWt)のPWR(KLT-40S型、20%濃縮ウラン使用)を2基搭載し、完成後は極東のカムチャッカ地域のビリュチンスク(ロシア海軍の軍港)に曳航され、2012年までに燃料が装荷される予定である。運転期間は、12年の3サイクルで保守期間も含めて38年間の予定である。また、更なる建設計画があり、2009年2月に、シベリアのサハ共和国(ヤクーチヤ)に4基建設することで共和

国政府と合意していて、最初の 1 基目は、チュクチ(Chukotka)自治区のペペク(Pevek)の港(東シベリア海に面している北極海航路の中継地、北極圏の都市)で立地調査が進められている。また、北極海等の沿岸、コラ半島、ヤマル半島(中央シベリア)等などでの資源開発用に更なる建設計画もある。また、第一号基より大型のものや小型のものも提案されている。

(2)小型高速炉の開発³⁷⁾

ロシアにおける小型高速炉の開発については、2009年12月25日、国営統括原子力企業 Rosatom と En+ (ロシア最大のエネルギー民間企業で、世界最大のアルミニウムとアルミナの生産企業 United Company RUSAL の親会社)は 50/50 の出資比率で、小型の高速炉を商業化するための会社 AKME エンジニアリングを設立した。開発するのは、冷却材に鉛ビスマスを用いる高速炉 SVBR-100 で出力は 100MWe (280MWt) であり、これまで7隻の原子力潜水艦(155MWt)で使用されていた技術を 2019 年までに商業用に改良を行う予定である。原子炉出口温度は 495°C で燃料は 16.5% の酸化物ウラン燃料を使用し、燃料交換は 7~8 年毎とのこと。

(3)原子力推進ロケット³⁸⁾

上記の他、ロシアは原子力推進ロケットを開発中で、ロシア政府は、2010 年の開発予算として 5 億ルーブル(16.7 百万ドル)を認めた。2012 年までに設計ドラフトの最終案をまとめる予定で、原子力エンジンは Rosatom が担当し予算は 430 百万ルーブル、残りの 80 百万ルーブルは宇宙省の Roscosmos が使用することになっている。Roscosmos は開発に必要な予算は 170 億ルーブル(580 百万ドル)で、この予算では 3% にも満たないため概念設計にも不足すると述べているが、別の報告書では、2015 年に試験、2018 年に製造開始としている。ロシアの原子力エンジンは、プラズマまたはイオンエンジンの様であり、月や火星への往復、秘密衛星にも使用を予定している。

3)韓国の開発動向

2010 年 6 月 14 日、教育科学技術部は、韓国電力に率いられた国内企業 13 社 (POSCO and STX Heavy Industries Co.を含む)が小型の PWR の SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor) の設計技術承認のプロジェクトに 1000 億ウォン(81.8 百万ドル)を投資すると述べた。これにより従来より研究開発を進めてきた国立韓国原子力研究院によって 1700 億ウォンの国家プロジェクトが組織されることになる。³⁹⁾

SMART は熱出力 330MWt で、B&W の mPower 等と同様、原子炉圧力容器内に蒸気発生用の熱交換器を内蔵した小型の PWR で、海水の淡水化などへの熱利

用に応用でき、100MWe まで発電できるように設計されている。開発途上国(大電力の送電網がなく分散型電力網の国に)のエネルギー源としての市場展開を計画している。

4) インドの開発動向^{40),41)}

2009年9月16日、IAEAの会議に出席したインド原子力委員会委員長兼原子力省長官は、インドの原子炉輸出戦略として、AHWR(Advanced Heavy Water Reactor)の改良型のAHWR300-LEU(重水減速沸騰軽水冷却型原子炉)についての発表を行っている。AHWRは、トリウム燃料サイクルの最終段階の原子炉で、U233にトリウムを加えた燃料を使用するが、AHWR300-LEUでは平均濃度でU235が19.75%の濃縮ウランとトリウムの混合酸化物燃料を使用し、平均の核分裂性物質の濃度は4.21%である。(Th232が中性子を吸収して生成するU233による燃焼で出力の39%を得ることができる。)

特徴は、AHWRが備えている第4世代の安全性として受動的安全設計が施されていて、緊急事態においても運転員は3日間の対応余裕があり、いかなる環境下でも敷地境界を越える事故時の緊急計画を策定する必要がないとしている。このすぐれた安全性は、人口密度の高い都市近郊への立地を目指しているためである。また、この燃料は、軽水炉に比べてプルトニウムの生成量が少なく(U238よりTh232の方が中性子吸収率が大きい)、しかも生成するプルトニウム中のPu238の同位体比率は3倍多くなり取り扱いが困難(α 崩壊で半減期87年であり比放射能が高い)で核拡散抵抗性が高いとしている。小型炉市場で、新たな市場を開拓できる可能性を持っていると思われる。

5) アルゼンチンの開発動向

アルゼンチンの上院は、2009年11月24日、アルゼンチンが独自に開発した小型のPWRの建設法案を可決した。この小型炉は、2006年に発表された政府の原子力計画に基づき、アルゼンチンのINVAP(アルゼンチン原子力委員会の研究所からスピン・オフした公営企業でエジプトとオーストラリアへ研究炉を輸出している)がアルゼンチンの原子力委員会(CNEA: *Comisión Nacional de Energía Atómica*)との契約で開発してきたもので、出力27MWe(100MWtの研究炉としても利用可能)の小型のPWR(mPowerなどと同様に、原子炉圧力容器内に蒸気発生用の熱交換器を内蔵)で、CAREM(Central Argentina Modular Elements)と呼ばれていて、8MWeで発電しながら海水の淡水化も行えるように設計されている。また、出力を300MWeまで増強したタイプの設計も行われている。⁴²⁾

なお、2010年6月には、アルゼンチン国防相が海軍艦船へINVAPの小型炉の搭載を検討していると発言している。⁴³⁾

6)南アフリカの開発動向

南アフリカ政府は、1999年に、発電効率と安全性に優れたヘリウムガスを冷却材に使用する高温ガス炉の実用化を図るために PBMR (Pebble Bed Modular Reactor (Pty) Ltd)を設立した。現在の PBMR への出資比率は、国営電力会社の Eskom と国営の開発資金融資会社 IDC (Industrial Development Corp.) が 85%、Westinghouse (設立当初は BNFL) が 15%となっていて、これまでの各社の投資額は、Eskom が 817 百万ランド、IDC が 457 百万ランド、Westinghouse は 460 百万ランドである。⁴⁴⁾

技術開発状況は、2008年12月には、燃料の製造に成功し(直径数百ミクロンの二酸化ウラン(濃縮度約10%)の粒子を黒鉛と炭化ケイ素で4重に被覆した直径約1mm程度の粒子燃料を多数黒鉛マトリックス中に封じ込め、テニスボールほどの球状(直径6cm)に成形したもの。GAや原子力機構が開発している高温ガス炉では、粒子燃料を黒鉛マトリックス中に封じ込め軽水炉と類似した燃料棒等の形に成形したものを使用する。)、米国のアイダホ国立研究所で評価試験中である。また、2009年には、高温のヘリウムを直接利用するガスタービン発電方式から、熱交換器を使用して高温の水蒸気(720°C)を作り発電または熱利用する方式に変更した。目標出力も400MWt(165MWe)から200MWt(80MWe)に変更している。海外との協力関係では、中国及び米国と研究協力協定を結んでいる他、日本の三菱重工とは2001年から高温ヘリウムガスタービンの共同開発(委託契約も含む)を行ってきていて、2010年2月にはPBMRの商業化に関する協力の覚書を締結している。^{45),46),47)}

南アフリカ政府からの資金供給は2006/7年会計から2009/10年会計の間に72億ランド(約9.5億ドル)が燃料工場の開発等に提供されたが、2010年2月、南アフリカ財務省は財政難により、2010/11年会計予算では3.6百万ランド(約50万ドル、2009/10年会計予算は17.4億ランド(約2.4億ドル))に大幅減額すると発表し、これに対してPBMRは、職員約800人の75%を削減しなければならないと述べていて⁴⁸⁾海外等からの出資を募っていたが状況は好転せず、2010年8月10日の報道⁴⁹⁾では、PBMRを管轄する国営企業省は数週間以内にPBMRを完全に廃止する案を内閣に願ひ出ると述べている。

大型軽水炉建設に関する2007年のEskomの計画では、2025年までに20GWeの原子力発電設備を建設する計画で、建設の第一段として、4GWeの原子力発電所の建設を2010年から開始するため2008年に入札を行い、建設メーカーを決定するはずであった。Areva(EPR1600)とWestinghouse(AP1000)が応札したが世界的金融危機の影響で入札は中止されたままである。PBMRプロジェクトが中止になれば、またしても、南アフリカの原子力産業界や人材を育てる大学に大きな影響を及ぼすことになる。

既に、貴重な熟練した技術者等が米国に流出しており今後も増えると予想されていて、南アフリカの原子力関係者は、政府が新たな原子力プログラムを立ち上げなければ原子力技術者の空洞化が起こると心配している。南アフリカ政府は、9月までに今後20年間のエネルギー政策を作成する予定であり、原子力産業界はこの計画を待っている状態である。⁵⁰⁾

今後の動向に十分注意する必要がある。

参考資料

- 1) “SNAP Overview”, U.S.DOE
<http://www.etec.energy.gov/History/Major-Operations/SNAP-Overview.html>
- 2) “ Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends”, IAEA-TECDOC-1451, IAEA, May, 2005
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1451_web.pdf
- 3) “Nuclear power: Obama team touts mini-nukes to fight global warming”, Christian Science Monitor, May 30, 2010
<http://www.csmonitor.com/USA/2010/0330/Nuclear-power-Obama-team-touts-mini-nukes-to-fight-global-warming>
- 4) “Rosatom And En+ Group Form JV To Create Fast Neutron Reactor”, Rosatom, January 5, 2010
http://www.rosatom.ru/en/about/press_centre/news_ROSATOM/index.php?id4=15715
- 5) “6 Nuclear Power Startups To Watch”, Earth2Tech, February 17, 2010
<http://earth2tech.com/2010/02/16/6-nuclear-power-startups-to-watch/>
- 6) “Miniature Nuclear Plants Seek Approval to Work in U.S (Update1)”, Bloomberg, May 17, 2010
<http://www.businessweek.com/news/2010-05-17/miniature-nuclear-plants-seek-approval-to-work-in-u-s-update1-.html>
- 7) “世界の果てに「原子力電池」”, 日経ビジネス, 2010年5月14日

<http://business.nikkeibp.co.jp/article/topics/20100514/214398/>

- 8) “Alternate Energy Holdings, Inc. Signs MOU With Hyperion Power to Manufacture Small, Modular Nuclear Reactors in China and Market World-Wide”, Alternate Energy Holdings, June 14, 2010

http://www.marketwatch.com/story/alternate-energy-holdings-inc-signs-mou-with-hyperion-power-to-manufacture-small-modular-nuclear-reactors-in-china-and-market-world-wide-2010-06-14?reflink=MW_news_stmp

- 9) Hyperion power Generation Website

<http://www.hyperionpowergeneration.com/about-invest.html>

- 10) “A Preassembled Nuclear Reactor”, Technology Review, June 16, 2009

<http://www.technologyreview.com/energy/22867/>

- 11) “Will Babcock & Wilcox's tiny reactor make nuclear power practical?”, Dvice, June 12, 2009

<http://dvice.com/archives/2009/06/will-babcock-wi.php>

- 12) “Partners propose smaller, cheaper nuclear reactors”, Tennessean, July 15, 2010

<http://www.tennessean.com/article/20100715/NEWS01/7150332/Partners+propose+smaller++cheaper+nuclear+reactors>

- 13) “B&W mPower™ —a progressive energy solution—”, B&W , April 1, 2009

http://www.state.nj.us/dep/cleanair/hearings/powerpoint/09_mpower.ppt

- 14) “Babcock & Wilcox confirms Bedford Co. facility”, Roanoke Times, July 28, 2010

<http://www.roanoke.com/business/wb/255030>

- 15) “TVA backs firm exploring small nuclear reactors”, Tennessean, August 3, 2009

<http://www.tennessean.com/article/20090803/NEWS01/908030339/1017/NEWS03/TVA+backs+firm+exploring+small+nuclear+reactors>

- 16) “B&W and Bechtel Form Alliance to Commercialize World’s First Generation III++ SMR Nuclear Plant”, Bechtel/Babcock & Wilcox, July 14, 2010
<http://www.bechtel.com/2010-07-14.html>
- 17) “Introduction to NuScale Design”, NuScale Power, July 24, 2008
http://www.nuscalepower.com/pdf/NRC_preapp_mtg_072408_DESIGN_2_no_animation.pdf
- 18) “History of the NuScale Power Design”, NuScale Power
<http://www.nuscalepower.com/an-About-Company-History.php>
- 19) “The regulatory approval process and NuScale systems”, NuScale Power
<http://www.nuscalepower.com/ri-Nuclear-Regulatory-Info-And-Process.php>
- 20) “Galena opens the door to nuclear project”, Alaska Journal of Commerce, December 24, 2004
http://www.alaskajournal.com/stories/122604/loc_20041226003.shtml
- 21) “Small Nuclear Power Reactors”, WNA, May 13, 2010
<http://www.world-nuclear.org/info/inf33.html>
- 22) “小型原子炉の概念構築と革新要素技術開発”, 電力中央研究所, 平成 17 年 3 月
<http://criepi.denken.or.jp/result/pub/annual/2005/05kiban16.pdf>
- 23) “Sandia team developing right-sized reactor”, Sandia National Laboratories, August 25, 2009
<http://www.sandia.gov/news/resources/releases/2009/powerplant.html>
- 24) “Sandia Designing Factory Mas1s Producable Right Sized Reactor”, Next Big Future, August 31, 2009
<http://nextbigfuture.com/2009/08/sandia-designing-factory-mass.html>
- 25) “General Atomics Proposes a Plant That Runs on Nuclear Waste”, Wall

Street Journal, February 22, 2010

http://online.wsj.com/article/SB10001424052748703791504575079370538466574.html?mod=WSJ_hpp_LEFTWhatsNewsCollection

26) “Changing the Game for Nuclear Energy – Energy Multiplier Module”, General Atomics

http://www.ga.com/energy/em2/pdf/EM2_presentation.pps

27) “Plans for next generation nuclear”, WNA, September 21, 2009

http://www.world-nuclear-news.org/NN_Plans_for_next_generation_nuclear_2109091.html?jmid=10082&j=239061222&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Daily+21+September+2009+%28239061222%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Eego%2Ejp

28) “Loan guarantee expansion”, WNA, February 2, 2010

http://www.world-nuclear-news.org/NN_loan_guarantee_expansion_0202102.html

29) “Teams compete for NGNP design”, WNA, March 9, 2010

http://www.world-nuclear-news.org/NN_Teams_compete_for_NGNP_design_0903101.html

30) “Fission Surface Power (FSP) concept studies”, NASA

http://www.grc.nasa.gov/WWW/TECB/fsp_concept_studies.htm

31) “A Lunar Nuclear Reactor—Tests prove the feasibility of using nuclear reactors to provide electricity on the moon and Mars—”, Technology Review, MIT, August 17, 2009

<http://www.technologyreview.com/energy/23247/?a=f>

32) “Advanced Reactors”, U.S.NRC

<http://www.nrc.gov/reactors/advanced.html>

33) “Sen. George Voinovich to introduce bill that would triple DOE's budget for developing advanced small modular reactors”, Platts, June 29, 2010

<http://www.platts.com/RSSFeedDetailedNews.aspx?xmlpath=RSSFeed/H>

[eadlineNews/Nuclear/6150338.xml](http://en.rian.ru/photolents/20100701/159656221.html)

34) “The launch ceremony for the Akademik Lomonosov floating nuclear power station (PATES)”, RIA Novosti, July 12, 2010
<http://en.rian.ru/photolents/20100701/159656221.html>

35) “Fuel for Russia's first floating plant”, WNA, July 20, 2010
[http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Fuel for Russias first floating plant-2007104.html?jmid=14562&j=249835664&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Daily%3A+Uranium+resources+for+at+least+a+century+%28249835664%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Ego%2Ejp](http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Fuel+for+Russias+first+floating+plant+2007104.html?jmid=14562&j=249835664&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Daily%3A+Uranium+resources+for+at+least+a+century+%28249835664%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Ego%2Ejp)

36) “Nuclear Power in Russia”, WNA, July 1, 2010
<http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html>

37) “Initiative for small fast reactors”, WNA, January 4, 2010
[http://www.world-nuclear-news.org/NN Initiative for small fast reactors 0401102.html?jmid=14015&j=242882849&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Weekly+16+December+2009+%2D+4+January+2010+%28242882849%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Ego%2Ejp](http://www.world-nuclear-news.org/NN+Initiative+for+small+fast+reactors+0401102.html?jmid=14015&j=242882849&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Weekly+16+December+2009+%2D+4+January+2010+%28242882849%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Ego%2Ejp)

38) “Russia assigns \$16.7m for nuclear spaceships”, Register, January 14, 2010
http://www.theregister.co.uk/2010/01/14/russian_nuke_spaceship_initial_funds/

39) “U.S. Korea speeds up small nuclear power reactors project”, Xinhua, June 14, 2010
<http://english.people.com.cn/90001/90777/90851/7026448.html>

40) “Evolving Indian Nuclear Programme—Rationale and perspective”, Anil Kakodkar, Atomic Energy Commission, India, Public lecture at Indian Academy of Science, Bangalore, July 4, 2008
<http://www.dae.gov.in/lecture/paperiasc.pdf>

- 41) “AHWR300-LEU-Advanced Heavy Water Reactor with LEU-Th MOX Fuel”, Bhabha Atomic Research Centre, Department of Atomic Energy, Mumbai, India
<http://www.dae.gov.in/gc/ahwr-leu-broc.pdf>
- 42) “CAREM small reactor set for Formosa province”, WNA, December 1, 2009
<http://www.world-nuclear-news.org/NN-First CERAM reactor set for Formosa province-0112094.html>
- 43) “Nuclear propulsion an option for Argentina”, WNA, June 8, 2010
http://www.world-nuclear-news.org/NN_Nuclear_propulsion_an_option_for_Argentina_0806101.html?jmid=17270&j=248371927&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Daily%3A+GdF+Suez%2C+EOn+partner+on+Italy+%28248371927%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Ego%2Ejp
- 44) “S. Africa Halts Funding to Pebble Bed Nuclear Project (Update1)”, Bloomberg, February 18, 2010
<http://www.businessweek.com/news/2010-02-18/s-africa-halts-funding-to-pebble-bed-nuclear-project-update1-.html>
- 45) “PBMR modifies the design for Koeberg demo power plant”, Engineering News, August 7, 2009
<http://www.engineeringnews.co.za/article/the-pbmr-modifies-design-planned-for-koeberg-demo-plant-2009-08-07>
- 46) “南アフリカ共和国の小型原子炉用ヘリウムタービン発電機基本設計などを受注 小型高温ガス炉による発電設備の実証へ”, 三菱重工, 2004年12月13日発行 第4299号ニュース
<http://www.mhi.co.jp/news/sec1/200412134299.html>
- 47) “MHI to collaborate on PBMR development”, WNA, February 4, 2010
http://www.world-nuclear-news.org/C-MHI_to_collaborate_on_PBMR_development-0402107.html

- 48) "PBMR pullback a 'painful' decision, Hogan admits", Engineering News, April 16, 2010
- 49) "S.Africa to close nuclear technology firm: paper", Reuters, August 10, 2010
<http://af.reuters.com/article/topNews/idAFJOE6790E320100810>
- 50) "SA's nuclear pullback impacts current skills pool", Creamer Media's Engineering News, August 20, 2010
<http://www.engineeringnews.co.za/article/sa-headed-for-nuclear-skills-shortage-2010-08-20>