

第四章 核融合研究装置 EAST と原子力開発

中国は、EAST という超伝導磁石を用いた核融合研究装置を 2006 年に完成させ、実験を開始した。核融合研究装置のすべての電磁石コイルを超伝導化したのは、米欧日露という核融合研究先進国に先駆けて世界で初めての成果である。本章では EAST に焦点を当て、そのうえで中国の原子力全体を概観する。

一. 核融合研究装置 EAST

核分裂と核融合

原子力の利用には、核分裂反応を利用するものと、核融合反応を利用するものの 2 種類がある。核分裂反応はウランなどの重い元素で起こる反応で、中性子を吸収したウランなどの原子核が 2 つに分裂する際に放出される膨大なエネルギーを利用する。現在稼働中の世界中の原子力発電所で利用されており、1956 年に英国で商業用の原子力発電所が稼働して以来、50 年以上にわたる歴史がある。核分裂による原子力発電は早期に実用化されたものの、ウラン 235 という地球上に偏在する比較的少ない資源を利用する必要があること、分裂した破片が強い放射能を有する物質となり放射性廃棄物が出ること、安全性に議論があることなどの問題を抱えている。日本では、東京電力福島第 1 原子力発電所が、2011 年に東日本大震災で発生した大津波により電源を喪失し、炉心のメルトダウンも含めた重大な原子力事故を発生させたことは記憶に新しい。

一方核融合反応は、水素など非常に軽い元素で起こる反応であり、2 つの原子核がくっつく（融合）ことにより放出される膨大なエネルギーを利用する。我々地上の生物がいろいろな形で利用しているエネルギーの源は、ほとんどが太陽から降り注ぐエネルギーであるが、その太陽のエネルギーの起源が、太陽の内部で行われている核融合反応である。

核融合反応によるエネルギーの利用には、核分裂に比較していくつかの長所がある。一つ目は、利用できる資源が地球に無尽蔵に近く存在することである。必要な元素は水素、重水素、リチウムで、これらは海水や天然資源として地球上に多く存在する。

二つ目の長所は、放射性廃棄物がほとんど発生しないことである。核融合反応の後に発生するのは、ヘリウムという放射能を持たない安定した物質であるため、原理的に放射性廃棄物の問題は避けられる。「ほとんど」と書いたのは、核融合反応で出てくる中性子が原子炉に吸収され、原子炉の材料などが放射能を有するようになるためである。これを物質の放射化と呼ぶが、放射化によって生まれる放射性物質の量や強さは、核分裂反応の場合とは比べものにならないほど小さい。

さらに、万が一原子炉内で不測の事態が発生した際も、安全性などの点で核分裂反応より優れている。福島事故でも分かるように、核分裂反応がいったん停止してもその後長い間冷却し続ける必要があり、また再臨界による暴走という危険性も否定できない。一方核融合反応の場合には、何らかの要因により原子炉内でゆらぎが発生した場合、閉じ込められていたプラズマ（分子が、原子核のプラスイオンと電子に分離し、別々に運動している状態）が拡散し、自動的に核融合反応が継続できなくなるため、暴走することはない。また放射性物質もほとんどないため、反応が停止した後の措置が非常に容易である。

これほど長所がある核融合の実現が、なぜ世界中で進んでいないのであろうか。核融合を起こすには、その名の通り原子核を融合させる必要があるが、原子核はプラスの電気を帯びている。つまり、原子核間の距離が近づけば近づくほど強い反発力が発生し、普通の状態では融合しない。地上で核融合反応を発生させるためには、原料となる水素や重水素を高温、高密度のプラズマ状態にする技術が必要で、このプラズマを一定の場所に閉じ込めておくことか、これまで成功してこなかったのである。ちなみに、太陽の内部では、膨大な量の水素が非常に高温と高密度な状態にあるため、水素の原子核同士がその反発力に打ち勝って近づくことができ、核融合反応が可能となる。

トカマクと ITER 計画の発足

核融合反応をエネルギー源にしようとする研究開発は、第二次世界大戦前から米国やソ連などで軍事研究の一環として開始されたが、大戦後は平和利用を目的として技術が開発されるにいたった。1951年に磁力でプラズマを閉じ込める試みが公表されたが、その後の研究開発の歩みは遅く、プラズマの予想外の不安定性や、不純物の混入に悩まされる時代が続く。

転機となったのは、ソ連の研究者が開発したトカマク型核融合研究装置である。トカマク型装置は、1950年代にソ連の物理学者であるアンドレイ・サハロフ（1921～89）らによって考案されたものであり、「トカマク(tokamak)」は装置の構造を示すロシア語の電流(tok)、容器(kamera)、磁場(magnit)、コイル(katushka)の頭文字を組み合わせた造語である。1966年、IAEA（国際原子力機関）が主催した国際会議においてソ連は、当時としては画期的であった1,000万度というプラズマ温度を、トカマク装置T-3により達成したことを報告した。これが契機となって世界の核融合研究開発は、トカマク型を用いた装置での実験が主流となった。

1970年代にトカマク型の中規模装置であるダブレット-III（米国）やT-10（ソ連）の建設運転を経て、1980年代にはTFTR（米国）、JET（EU）、JT-60（日本）という世界三大トカマク装置の建設運転にいたる。そして1990年代に、世界三大トカマク装置での実験により、プラズマを加熱するための電力などの入力エネルギーと核融合反応による出力エネルギーが等価となる、いわゆる「臨界プラズマ条件」が達成された。

三大トカマク装置が運転され成果を出しつつあった 1985 年、ソ連のミハイル・セルゲーエヴィチ・ゴルバチョフ書記長は、ジュネーブで米国ロナルド・レーガン大統領と首脳会談を行った。その席でゴルバチョフ書記長は、三大トカマクに続く核融合研究装置の開発を、米ソを含む主要先進国による国際協力で行うことを提案した。レーガン大統領はこれに賛意を示し、日本と欧州にも参加を呼びかけ、ITER 計画がスタートすることになった。ITER は、「International Thermonuclear Experimental Reactor」（国際熱核融合実験炉）の略語である。また、ITER はラテン語で、「道」「旅」を意味する。

ITER のその後の歩みはゆっくりしたもので、まず概念設計が 1990 年まで行われた。続いて工学設計が長期間にわたって行われ、2001 年に最終設計報告書がとりまとめられている。この報告書を基に、米国、ロシア（旧ソ連）、日本、EU に、新たに参加を表明した中国と韓国を加えて、実験炉を建設するサイト（場所）を選定する協議が行われ、2005 年に南フランスのプロバンス地方にあるカダラッシエに決定。同年末にはインドも参加することになった。

現在 ITER の建設は、2020 年の運転開始を目指して着々と進んでいる。

中国の最新鋭装置「EAST」

中国の核融合研究は、1950 年代後半、中国西南部に位置する四川省成都市の中国核工業総公司西南物理研究所核融合科学センターで開始された。1978 年には中国科学院が、新たに内陸東部の安徽省合肥市にプラズマ物理研究所を設置し、西南物理研究所とともに中国の核融合研究を先導する。

この時点で、世界の核融合研究の主力装置はトカマク方式の施設になっており、以降、中国の両研究所ともトカマク型の装置の建設運用を中心に研究を進めている。中国の課題は、米欧日露にいかにかッチアップするかである。四川省成都市の西南物理研究所は HL-1、HL-2A、安徽省合肥市のプラズマ物理研究所は HT-7 といったトカマク型の実験装置を設置し、研究の蓄積を行ってきた。

安徽省合肥市は、比較的発展の遅れている内陸部にあるが、人口は 400 万を超えており、市内に広大な工業団地が造成されつつある。中国科学院プラズマ物理研究所は、合肥市の郊外にある湖の一部突き出た半島に設置された。半島の付け根がそれほど大きくなく、あたかも湖に浮かぶ島のような形であるため、プラズマ物理研究所を含め、中国科学院傘下の五つの研究所がある敷地全体は科学島と呼ばれている。

車で科学島に入るとまず目に飛び込んでくるのが、小さな子供たちが大勢遊んでいる風景である。そこは、中国科学院が運営している、科学島に住む人たちのための保育園である。旧ソ連の方式を導入し、研究所が研究機能だけではなく、学校、場合によっては農場なども持っている例がある。この保育園もそのたぐいである。



科学島入り口の石碑

江沢民元中国国家主席の署名がある

プラズマ物理研究所は、職員数が 500 名前後、学生が 300 名程度いる。中国科学院傘下の研究所は、学生を受け入れて研究に従事させ、その間の研究実績により博士号を授与できるシステムを持つ。

プラズマ物理研究所の誇る、最新鋭のトカマク型核融合研究装置が EAST である。EAST という名称は、「Experiment : 実験」「Advanced : 先進」「Superconducting : 超伝導」「Tokamak : トカマク」の頭文字をつなぎ合わせたものであるが、他方、四川省成都市にある西南物理研究所が中国の西部にあるのに対し、安徽省合肥市のプラズマ物理研究所が東部 (EAST) にあることにもよる。

プラズマ物理研究所の李建剛 (1961~) 所長は、英国の核融合研究のメッカであるカラム研究所で勤務した後、2005 年からこの研究所の所長を務めている。所長就任は 40 歳代前半ときわめて若い。

世界初の全超伝導トカマク装置

核融合反応を起こすためには、水素などの元素をプラズマにして一定の場所に閉じ込める必要があるが、それには強力な電磁石による磁力が不可欠である。電磁石を普通 (常伝導) の銅材で作ると大量の電力を消費してしまうことになる。生産された電力より投入された電力が大きくなれば、結果的には発電したことにはならない。実用化のためには、電力の消費を少なく抑えられる超伝導材料で磁石を作り、プラズマを閉じ込める必要があった。

1980 年代当時は超伝導の技術開発がそれほど進んでおらず、世界三大トカマク装置も、磁石が銅材で作られていた。中国はこれに着目し、EAST の建設にあたってすべてのコイルを世界で初めて超伝導化することを決断した。2006 年に建設を終了し、同年最初のプラズマ発生に成功して、世界初の超伝導トカマク装置を完成させた。ちなみに EAST

完成の翌年に韓国は、K-STAR というやはりすべてのコイルを超伝導化したトカマク装置を完成している。K-STAR の大きさは、EAST とほとんど同じ程度である。



EAST の前に立つ李建剛氏（右）と筆者

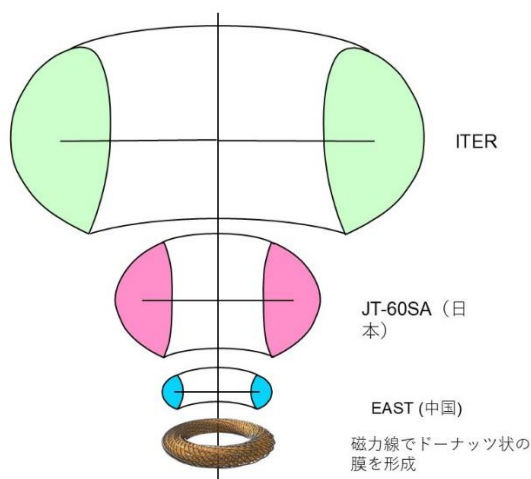
核融合反応を実用化していくためには超伝導コイルが不可欠であり、その意味で EAST の完成は、世界的に見ても画期的な業績である。EAST により、超伝導施設に特有の技術開発や人材養成に取り組むことができるため、中国は核融合の実用化に向けてよいポジションを確保できたといえよう。ITER への貢献に関し、超伝導関連試験施設としての EAST の有効性を、中国は強調している。

中国は、この EAST の建設運転の成功をたいへん誇りにしている。2007 年には「中国基礎研究十大ニュース」に選ばれ、さらに 2008 年には中国科学院の「2007 年度傑出科技成果賞」を獲得している。

容量の限界

しかし EAST の完成により、中国の核融合に関する実力が米欧日などの核融合先進国と肩を並べるまでになったかという点、必ずしもそうではない。その大きな理由は、EAST の大きさである。現在最先端のトカマク装置はドーナツ状をしており、その断面は単純な円形ではなくおむすび型で、ITER、三大トカマク装置 (TFTR、JET、JT-60)、

EAST も同様である。ITER、JT-60SA (JT-60 を改造中の施設で、SA は Super Advanced の略)、EAST のそれぞれの断面を比較したものを図示した。



トカマクの直径・断面比較図

どの装置も一番下の図の通りドーナツ状である

三大トカマク装置や ITER と比較すると、EAST はそれほど大きくない装置である。プラズマを閉じ込めて核融合を起こさせるためには、ドーナツ状の容器の容量が大きいことが望ましいが、ITER の容量は約 1,000 立方メートル、JT-60 で約 60 立方メートルであるのに対し、EAST は約 10 立方メートルに過ぎない。核融合の実用化のためには、電磁石などに使用する電力（入力エネルギーより、核融合反応によるエネルギー（出力エネルギー）が大きくなければいけない。そのためには、核融合研究装置全体の容量も一定以上の規模が必要である。大きな容器の中でプラズマを安定的に閉じ込め高温と高密度にするためには、磁石の大型化、加熱システムの強化、計測システムの精密化などの技術開発が欠かせない。したがって、より大きな実験装置を作製し、その装置によって研究開発を進めることが重要なのだ。そのためには、EAST では大きさの点で限界がある。

ITER プロジェクトの関係者も、この事情をよく認識している。全超伝導トカマクとして先行した EAST や韓国の K-STAR などの運転経験や研究開発成果の有効活用を考慮しつつも、より大きな容量を持つ日本の JT-60 を、2014 年度末までに日欧の協力のもと、全超伝導トカマク装置に改造する予定だ。それが、先に少しだけ紹介した JT-60SA である。

外国の技術や部品も使う

中国流の科学技術の典型的な手法は、EAST の開発でも見られる。1994 年に、EAST の前段階としてプラズマ物理研究所に設置されたトカマク装置 (HT-7) には、一部超伝

導のコイルが採用されているのだが、HT-7はもともとロシア（旧ソ連）が開発した装置であった。これを合肥市のプラズマ物理研究所に輸入のうえ、一部改良を加えて実験を行ったのである。

EASTの開発は、HT-7の成果を踏まえて行われたが、設計には米国のプリンストン大学とゼネラル・アトミックス社の協力があつた。さらに、EASTの最大の特徴である超伝導磁石の材料は、ロシアから輸入している。しかしEASTの関係者は、一部を外国に依存していることなどまったく意に介していない。むしろ、超伝導材料をコイルとして成型加工することや他の部品をすべて自前で製作したことを強調しており、全体の国産化率は九割に達すると意気軒昂であつた。

また、中国独特と思われるのは、EASTのような大型装置であっても、重要な部品の製造や組み立てを研究所の職員自らが実施することである。欧米諸国、日本、さらには韓国などでは、大型のトカマク装置の製造建設は電機メーカーなどに委託するのが普通である。しかし、EASTの場合には研究所の職員が動員され、たとえばドーナツ状の真空装置の内側のタイルは職員たちが一つ一つ貼り付けていった。また超伝導コイルは、材料こそロシアから輸入したものの、研究所敷地内に製造組み立て工場を設置し、巻き線処理、コイル化などはそで行っている。自分たちで製作する理由としては、中国国内に能力のあるメーカーが存在しなかったことと、予算的な制約があつたことなどによる。

核融合研究人材をいかに育成するか

EASTのあるプラズマ物理研究所は、博士号取得を目指す大学院生を大量に受け入れており、研究所の活性化につながっている。また、ITERに中国が参加し、EASTもITERプロジェクトでしかるべく役割を果たすことになっていることが、プラズマ物理研究所の人材育成によい影響を与えている。

中国政府は、2020年までの10年間で、核融合研究人材を2,000名程度育成することを目標にし、北京大学、清華大学、上海交通大学、復旦大学、中国科学技術大学といった一流5大学に核融合専門の学科を設置するとともに、200名にのぼる博士課程学生を支援する政策を打ち出している。このような人材育成が進めば、現在欧米や日本に比べて弱いと考えられる学術的なレベルも、確実に上昇していくものと期待される。

ただ、人口の多い中国にあつても、優秀な人材の確保には苦勞を伴う。プラズマ物理研究所はEASTを擁し世界最先端の研究をしているので、中国全土から核融合研究を目指す若者が殺到しているのではと、研究所幹部に聞いたところ、返ってきた答えが次のように意外なものであつた。

中国では中年以上の研究者の層が薄いため、若手の採用と育成が人材確保の中心となる。プラズマ物理研究所にいる学生の多くは博士号を取得する目的で研究しているため、博士号を取った後も彼らに居続けてもらうことが課題である。しかし、研究所は合肥市と

いう、大都会ではないところに位置しているため、若くて優秀な学生は外国や大都会の民間企業などに移っていく傾向が強い。

研究所側では彼らを引き止めるべく。給与や住宅の質の改善、学会や研究協力の打ち合わせのための外国出張の機会を増やすことなどは当然として、若者の自動車運転免許の取得を援助するためのプログラムまで実施するなど、涙ぐましい努力を行っている。日本の科学技術関係者も若手人材の確保に苦勞しているが、人材の層の厚い中国でもこのような努力がなされているのだ。

二. 原子力開発

EAST を中心に中国の核融合研究を見てきたが、ここからは原子力全般について触れておきたい。

両弾一星～軍事技術開発

中国では、清朝末の混乱、日本との戦争、中国国民党と共産党との内戦、新中国建国後の混乱と、近代化以降も科学技術振興にまで手が回らない状況が続いた。しかし軍事技術開発だけは例外である。1950年代以降、当時の最高指導者である毛沢東の強力なイニシアティブの下、「両弾一星」というスローガンにより核兵器およびミサイルの開発が強力に推進された。両弾とは原子・水素爆弾と弾道ミサイルであり、一星とは人工衛星である。

人工衛星とは、衛星だけではなく打ち上げ能力をも指すものであり、軍事的な弾道ミサイルを発射しうるロケットの開発も含まれている。その成果として、1964年に原子爆弾による核実験を、1967年には水素爆弾による核実験を成功させるとともに、1970年には自主開発の長征一型ロケットにより中国初の人工衛星である「東方紅一号」を打ち上げた。

一周後れの平和利用

軍事技術としての原子力開発は着々と進んだが、原子力技術の民生利用は遅れてスタートした。とりわけ、原子力発電所の建設着工は非常に遅く、1980年代に入ってからようやく始まった。中国の電力源の主体は火力発電で、原子力発電に代替していくとなると国内の石炭産業に打撃を与える可能性があったからである。しかし、1980年代に改革開放路線が定着し経済が拡大してからは、大幅な電力不足に陥ったため、政府は原子力発電の導入に踏み切った。

現在でも、原子力発電の設備容量はそれほど大きくなく、2012年1月現在で、運転中の原子力発電所は14基、設備容量1,195万キロワットに過ぎず、世界第九位である。ただし、21世紀に入ってからの経済発展を受け、原子力発電への傾斜が強まっている。現在世界で建設中の原子力発電所75基、約7,600万キロワットのうち、実に半分近くとなる30

基、3,300 万キロワットにのぼる原子力発電所が、中国で建設されている。

核燃料関連の技術開発についていえば、核兵器の開発から原子力開発が進んだこともあって、着実に前進しているといっていいただろう。平和目的でのプルトニウム利用も、欧米などではコストや核不拡散の観点から消極的であるが、中国ではプルトニウムを利用する高速増殖炉の開発が続けられている。

現在の軽水炉原子力発電所を支える核燃料関連事業についても、ウランの精錬・転換・濃縮、核燃料加工などの工場を国内に保有し、ほとんどが自前だ。ただ天然ウラン資源は、国内の埋蔵量が多くないため、オーストラリアやカザフスタンなどから購入している。

海外技術が中心の原子力発電

中国における原子力発電導入の一つの流れが自主開発路線、もう一つは海外導入路線である。

自主開発路線は、上海市の南に位置する浙江省嘉興市海塩県秦山鎮にある秦山原子力発電所で進められた。自主開発路線なので、発電所のメインコントラクターは中国企業だが、中国の技術のみでゼロから建設されたのではない。原子炉設計は、米国のウェスティングハウス社の旧式 PWR の公開資料で行われているし、主要機器は外国から輸入され、日本の三菱重工からも原子炉の中心部分である圧力容器が納入された。開発の第一期で 30 万キロワット級の発電所建設に成功し、第二期にはそれを 60 万キロワットまでスケールアップした技術で建設されているが、国産技術による原子力発電所の建設はその後停滞している。

秦山一号原子力発電所は 1985 年に着工し、1991 年に発送電を開始、1994 年に営業運転を開始したが、この秦山一号の建設中だった 1989 年に、同型の原子力発電所をパキスタンに売り込み、二基輸出することに成功している。

その後、パキスタンの発電所は順調に建設が進み、2000 年に運転開始し、現在にいたるまで順調に稼働している。パキスタンは、同じ規模の原子力発電所を続けて中国に発注しているが、中国国内で秦山一号と同型の原子力発電所はその後建設されていない。

一方、海外導入路線は、中国南部広東省の南シナ海に面した大亜湾の原子力発電所建設で開始された。最初の二基はフランスからの輸入技術であるが、その後、ロシアやカナダ、米国からの技術も導入されている。導入路線といえども、ずっと技術を外国に依存するのではなく、段階を踏んで国産化比率を高めていく予定であり、最終目標は自主開発の国産化路線と大差ない。

現在の状況は、国産技術による建設が進んでおらず、導入路線が主体である。ただ。短期間に多くの国から違った型の原子炉を導入したことや、フランスのアレバ社や米国のウェスティングハウス社などが、将来の大きな市場をにらんで最新鋭の原子炉技術を投入してきているため、導入した技術を完全には消化できない状況が続いている。

つまり、フランス、米国、ロシア、カナダといった四つの国の違った原子炉設計思想が

中国に存立し、さらに主要な構成部品も日本、韓国、スペインなどから輸入されるという、きわめて複雑な状況におかれているのだ。これは、もとはといえば、特定の国やメーカーに主導権が渡らないよう相互牽制をさせながら、中国国内の企業に原子炉の設計、部品等の製造、発電所の建設などの能力をつけさせようとの意図によるものである。しかし、導入した原子炉の形式があまりにも多すぎて、技術習得が効率的ではない。また、設計思想が違えば安全思想、安全基準、安全装置などが異なるため、結果として安全確保に支障をきたすおそれも無視できない。

実用化に向けた着実な歩み

中国は、原子力発電での開発の後れを取り戻すために、積極的に外国からの導入を行ってきたが、基礎的な研究開発においては、中国原子能科学研究院、中国科学院、大学などを中心に、着実に成果を積み上げている。研究所や大学において、軽水炉の次の原子炉技術といえる高速増殖炉、高温ガス炉、さらには既述した核融合の研究開発を実施している。

中国の大学が原子力開発に重要な役割を担っている例として、清華大学における高温ガス炉のプロジェクトがある。清華大学は、ドイツのユーリッヒ研究所や日本原子力研究開発機構との協力を進め、熱出力 10 メガワットの高温ガス炉実験炉を建設した。日本でも日本原子力研究開発機構が、茨城県大洗町に高温ガス炉実験施設を建設し運転したが、コストなどの点で実用化の見通しが立っていない。中国は、日本で行っていない発電にも成功しており、2013 年 1 月 8 日の『日本経済新聞』によれば、山東省榮成市石島湾で、この技術を生かした原子力発電所の建設工事を開始したとのことである。

人材育成の展望

中国の科学技術の強みである豊富な人材の育成は、原子力開発でも見られる。中国が原子力の商業利用を開始したころ、人材供給のため大学や専門学校、職業学校などが次々と設立されたが、1980 年代後半に発生した世界的な原子力スローダウン時代には、大学の原子力工学科閉鎖などが相次いだ。

しかし 2000 年以降には、原子力拡大時代に入り、中国でも大学の原子力工学科の復権が目立っている。原子力工学科を有する大学は 2007 年現在で 14 校を数え、各々数百名の学生を育成している。清華大学、上海交通大学、西安交通大学、中国科学技術大学などの有名校が含まれており、ハルビン工程大学では学部学生数が 1,000 名、大学院も入れると 1,300 名を超える学生が在学している。

住民の反対運動が課題に

中国は、あらゆる点で上意下達が徹底しているトップダウンの国であるため、他の欧米や日本などの西側先進国と比較すると、原子力発電所などの立地に苦しみことかないというのが、これまでの定説であった。また、中国において土地は国家のものであり、個人は

土地の使用権を持つことはできるが所有することができない。このため、たとえば都市部にオフィスビルやマンションなどを建設する場合でも、そこに住んでいる住民には反対をする術がなかった。

しかし、最近の報道によるとこうした状況にも変化が見られるようだ。工場の立地などをめぐり、住民と地方政府の間にトラブルが発生し、地方政府が住民の意向を受け入れて計画を変更する場合も出てきている。住民が大きな力とたのんでいるのが、中国でも爆発的に普及しているインターネットや携帯電話による情報伝達能力である。

2011年の福島第一原子力発電所の事故は、地球温暖化対策の切り札として世界で進みつつあった原子力発電の拡大に見直しを迫る結果になった。日本国内はもちろんのこと、ドイツでも原子力発電全面撤退となっており、他の国にも大きな影響を与えつつある。中国においては、まだ経済規模に比べて原子力発電所が多くないため、現在のところ原子力発電所の立地問題が顕在化していない。しかし、住民がインターネットなどによる情報発信という手段を持った現在、福島の事故以前に計画していた急激な原子力発電拡大路線を、そのまま維持できるかどうか注目されている。