

天然原子炉と福島原発事故 地球化学者黒田和夫の遺したもの

小嶋 稔

福島原発事故は放射性物質の流出で環境へ甚大な災害をもたらした。さらに私を含む同位体地球化学を専攻する者の多くは、福島第一原子力発電所一号炉のメルトダウンした核燃料が再臨界を起こし、大規模な核分裂連鎖反応を起こすのでは、との危惧を払拭し切れない。もしそのような事態ともなれば、東日本が壊滅するとの菅元首相の警告が現実のものになってしまう。加えて、こうした危惧を裏付けるように、去年7月に経済産業省で行なわれた「福島第一原子力発電所事故に関する技術ワークショップ」での報告は、たいへんショッキングなものであった。

このワークショップでは、2011年3月の原発事故の直後にウランの核分裂連鎖反応の再臨界が起きる可能性があったことが議論されている。細密な計算結果から連鎖反応の可能性が高かったにもかかわらず、なぜか大規模なウランの核分裂連鎖反応が起きなかった。しかしこの幸運は、海水の注入により、予想もしなかった塩素（正確には塩素系同位体のひとつ塩素35）の中性子吸収効果という、まったくの偶然に助けられた結果だったと結論している。さらに、この驚くべき事実に関する一般への報道が十分にはなされていない、というのもまた驚きである。

過去2年、放射能汚染の議論・報道がマスコミを賑わしている反面、さらに深刻な再臨界の議論が専門家の間ですら皆無に近い。しかし、1972年9月フランス原子力庁が発表したガボン協和国（アフリカ）での「オクロ天然原子炉」発見は、再臨界は原子炉内に限らず自然界でも起きる事を証明した。福島第一原発一号炉のメルトダウンしたウラン核燃料が現在どのよりの状態なのかよく分かっていない。しかし、メルトダウンの現状は、きわめて厳格なコントロール下で正常運転中の原子炉より、「オクロ天然原子炉」の「火元」になったオクロ・ウラン鉱床の状態に近い可能性も否定出来ない。

東電原発事故の対応は、現状ではほとんど汚染除去などの対症療法に限られているのは事態の緊急性からやむを得ない面もあるが、より長期的な視点からの再臨界の議論は、その結果の重大性を考えるとけっして看過されてはならない。「オクロ天然原子炉」は、こうした問題の解明に貴重な手掛かりを与えてくれる。

ここでは今後の日本と日本人にとって最大の課題となった福島原発事故の処理問題に「オクロ天然原子炉」の持つきわめて重要な科学的意義について述べたい。また「天然原子炉」という画期的なアイデアを世界で初めて提案した地球・宇宙化学者故黒田和夫教授——生涯の三分の二以上を帰化したアメリカ合衆国で過ごし、日本には比較的馴染みの薄いまま彼の地で2

002年に没した——の素顔の一面も紹介したい。まず現在のウラン核燃料原子力発電の誕生の場面をごく簡単に眺めよう。

ナチの脅威から逃れイタリアからアメリカ合衆国に亡命したエンリコ・フェルミ（ノーベル物理学賞受賞者）を中心にシカゴ大学の研究者らは、シカゴ大学キャンパスの隅にある体育館の地下実験室で初めて原子炉の実験に成功した。第二次世界大戦最中の1942年のことである。実験計画は極秘のベールに包まれ、詳細が発表されたのは戦後暫くたったのことである。この原子炉の出力はわずか2分の1ワット、豆電球を点す程度の実験炉であった。サッカー場の片隅には「1942年12月2日、人類はここに初めてウランの連鎖反応から原子力エネルギーをとりだすことに成功した」と書かれた小さな掲示板が立てられている。自然界にかつて存在したことの無い、人智を尽くした精巧の極みとも言えるべき原子炉の創造によって、人智は自然を超えた、とでも言わんばかりである。

実験に際し、フェルミらは当然ながら核分裂連鎖反応が周りの自然界に「飛火」しないか、という懸念を綿密に検討し、その結果を踏まえ実験に踏み切った。しかし、この「自然を超えた人智」という思い込みは間違いであったことが、シカゴ大学での実験原子炉成功から30年後に実証されることになる。その理論的予測は当時アーカンソー州立大学に赴任して間もない黒田和夫が1956年に発表した画期的な論文によってなされたのであるが、しかしこれは「天然原子炉の発見」というフランス原子力庁の1972年の公式発表まで、ほぼ完全に無視される。

フェルミらの創った原子炉がいかに人びとを驚嘆させたかは、当時の合衆国防務委員会の長官が「イタリアの航海者が新世界に上陸した」と賞賛したことからもうかがえる。余談ながらこの賞賛のメッセージは、原子炉の建設が極秘研究として遂行されたため暗号文で送られたという。このようにフェルミの業績は同じくイタリア出身のコロンブスによるアメリカ大陸到達にもたとえられ、さらにはガリレオ以来イタリアが生んだ最高の物理学者とも称されたフェルミの名声とも重なって、原子炉の完全性に対する世間の疑念を払拭するのに貢献した事は容易にうなずける。

一方の黒田和夫は1917年に福岡県に生まれ、東京帝国大学理学部化学科を卒業、1944年には異例の若さで同教室の助教授に就任したが、49年には助教授を退職し、新婚の妻を残してアメリカに渡った。冷戦下にあった当時のアメリカは日本やドイツなど旧敵国の優れた科学者に永住権を与え招聘していた。サンフランシスコに着いた黒田は、移民局の役人に、提示したoccupied Japanのスタンプの押された旅券などくずかごに捨ててしまえと言われ、仰天したと書いている。

アメリカに渡った黒田は渡米3年後にアーカンソー州立大学に準教授の職を得、化学を専攻するオランダ系アメリカ人と再婚、以降1987年に名誉教授として退職するまで同大学で地球・宇宙化学の研究と学生の指導に当たった。黒田の死後ルイズ夫人は、黒田の遺品の中にあつた戦時中の日本の原爆開発計画に関する文書を日本に返還し、文書は現在、理化学研究所

記念史料室に丁寧に保管されている。黒田自身は、当時の日本の原爆計画には直接関わってはいないが、偶然の巡りあわせで、理化学研究所で進行中だった原子爆弾開発計画に巻き込まれることになった。

終戦前日の8月14日、理化学研究所で原爆計画に関わっていた旧知の研究者が東大の黒田の研究室を訪れ、廃棄処分を命じられていた原爆計画に関する文書を持参し秘匿を頼んだ。明るく15日は無条件降伏受諾の日であり、原爆計画と黒田の直接の関わりはわずか10日であっけなく終わった。黒田自身の記録（『十七億年前の原子炉』講談社ブルーバックス、1988年）や後年黒田と筆者との会話の記憶をもとにこの間の経緯を簡単に辿ってみよう。

広島に原爆が投下された8月6日、黒田は理学部長の水島三郎教授に呼び出された。講座主任の木村健二郎教授（当時黒田は教授の女婿）がたまたま不在のため助教授の黒田が代わりに呼ばれたもので、広島に落とされた新型爆弾が原子爆弾かどうか、との政府からの問い合わせがあった、と言うのである。黒田は即座に、間違いなく原子爆弾です、と答えた。こうして黒田は木村教授のかわりに（当時木村教授は進行中の原爆開発計画における化学部門の総括者でもあった）海軍省に赴いた。そこで黒田は海軍省の高官に原子爆弾に関するすべての文献資料を早急にまとめて作成するよう要求される。さらにその高官は今後の原爆製造についても黒田に任せたいとの口ぶりだった。日本の原爆計画は、開戦後から陸軍の管轄下で理化学研究所を中心に進められて来たが、戦争が末期の状態になり、これまで傍観していた海軍も敗色濃厚な戦争の推移にいたたまれず、にわかに原爆開発にとびついたのである。

国家存亡の危機的状況下での要請である。海軍省を出た黒田は、その足で焼け残っていた神田の学士会館に行き、一部屋を自分に使わせるよう求めた。会館側は黒田の高揚感に圧倒されたのであろうか、最上の部屋を提供した。黒田はここから東大に通い原爆関係の文献をしらべ始めたが、敗戦で黒田の「原爆プロジェクト（海軍省版）」はあっけなく消滅した。しかし、敗戦前日の14日に旧知の研究者が密かに持ち込んだ書類は、後年日本の原爆研究の歴史を辿る唯一の公式文書として貴重な存在となった。露見すれば厳しい処罰も予想される危険を冒して思い切った行動をとった研究者が誰だったのか分からない。さらに黒田がどのようにしてアメリカに持ち込んだのかも不明である。

筆者が初めて黒田に会ったのは、1978年箱根で開催された希ガス地球化学に関する日米科学シンポジウムの折であった。黒田は彼の講演で、まずスライドの一枚目で日の丸を示し、これは日本の旗に非ず、自身の生涯の研究テーマの太陽である、とわざわざ断ってから講演を始めたのが印象深い。あとで本人から聞いた話では、このスライドは彼のアメリカの大学の学期最初の講義に必ず学生に見せるものだという。10年ほど後に第二回の同シンポジウムが、今度はアメリカ側の主催でイエローストーン国立公園において開かれた。この折に黒田は、「一回目の箱根では日本は旗色が悪かったが、このイエローストーンでは日本の完全勝利に終わった」と述べ、日本の研究者には面映い思

いを、またアメリカの研究者にはまたかの苦笑いを誘った。こうした黒田のいささか子供っぽい対抗意識は、生涯を通し黒田の言動に見られる。

戦時中、黒田の研究は自然界とりわけ温泉水等に含まれるラジウム含有量の調査であった。アメリカに渡った黒田は、1951年ニューヨークで開かれたアメリカ化学会の創立75周年記念特別年会「地球化学シンポジウム」の招待講演者として初めて国際会議の檜舞台に立った。このシンポジウムで黒田の温泉水のラジウム含有量に関する研究発表を聞いたアーカンソー州立大学化学科のエドワード教授は大変興味を示し、黒田を同大学へ招いた。アメリカ南部アーカンソー州の州都は後年人種差別撤廃運動の発端となったリトルロックで、保守的な土地柄である。エドワード教授は、州の国立公園内にある温泉の熱源は地下にあるラジウムではないか、という考えの持ち主で、これを証明しようと黒田の研究に目をつけた。結果は無論否定的であった。現在ではおそらく地球化学者のほとんどがこのような仮説を一笑に付すであろうが、筆者は、現在でもこうした話が意外な尾を引いていることをアメリカ南部での学会で実感する機会に出会っている。

アーカンソー州の隣のテネシー州にはアメリカ最大規模のオークリッジ国立研究所がある。筆者は、2010年にテネシー州で開催された地球・宇宙化学では最も権威のあるとされるゴールドシュミット国際会議において、地元選出の合衆国上院議員が国の原子力政策に関する招待講演を行い、あらゆる子不ルギーに比べ原子力が桁違いに有利だとする熱のこもった主張を聞いた。サッカー場一面程度の敷地があれば、アメリカ一国の放射性廃棄物の処理なら充分まかなえるというこの上院議員の主張を聞き、鼻白んだ記憶が生々しい。現在でも大規模な温泉の熱源が原子核エネルギーだとする極論を必ずしも否定しない原子力エネルギー擁護派の一部科学者の見解は、身近な大規模な温泉群（テネシー州の国立公園にはアメリカでも最大規模の温泉がある）に永年なじんできた同州の住民にとっては原子炉の安全性の間接的な保証にも感じられ、アメリカでもとりわけ保守的でしかも大規模な原子力関連の研究所を持つ南部諸州には強い政治的アピールを持つのであろう。

黒田は、温泉水のラジウム含有量の研究の傍ら、1947年になってようやく発表されたフェルミらの原子炉理論に強く興味をひかれ、独自の研究を始めた。フェルミらが、核分裂連鎖反応が外部に「飛火」するのを恐れ、詳しい研究を行つたことは既に述べた。この一環として、フェルミらはかつてキュリー夫人がラジウムを抽出したチェコのヨアヒムス・ウラン鉱床をはじめ、多くのウラン鉱床で核分裂連鎖反応の痕跡があるか否かの詳しい調査を行つた。しかしこの詳細な研究結果からはその痕跡は見出せなかった。ところが黒田はこの結論には重大な見落としがあるのに気づき、ウラン核分裂連鎖反応は自然界でも起こり得ると主張した。しかし、この黒田の主張はシカゴ大学のフェルミらの研究グループをはじめ多方面から強い反発を受け、無視され続けるが、20年後に事態は意外な展開を見せる。

1972年フランス原子力庁は、かつてフランスの植民地だった赤道直下のアフリカにあるガボン共和国のオクロ鉱山から産出されたウラン鉱石がきわめて異常な同位体組成を持ち、その同位体組成は現在の原子炉で使用済のウラン燃料の燃えカスと酷似している、と発表した。さらに原子力庁は、その同位体異常は20年程前に黒田が予言した天然原子炉仮説でほぼ完全に説明出来る、と結論した。これを報じたフランスの『ル・モンド』は、フェルミらの原子炉は自然の故知を真似たにすぎないと、黒田の画期的なアイデアを認めなかったシカゴ学派への皮肉とも取れる論評を載せている。フランスの科学者による天然原子炉の発見を賞賛することで、アメリカに押され気味の当時のフランス科学界が一矢を報いた、との思いも透けて見える。ともあれ黒田の画期的な予言はこうしてようやく陽の目を見る事になった。

1972年のオクロ天然原子炉の発見以来、天然原子炉の地球化学的研究は原子炉から出る放射性廃棄物処理のモデルとして重要視されてきた。こうした研究の結果、オクロ天然原子炉は、今から約20億年前にウランが臨界に達し、約15万年間にわたり原子の火が間欠的に燃え続けた、そしてその間の総出力は現在の100万キロワット級の原子力発電炉五基を1年間フル稼働した時に発生する熱エネルギーに相当する、と結論された。さらにオクロ天然原子炉は約15万年間連続的に核反応を起こしていたのではなく、かなり間欠的だった、とも推定されている。

現在の福島第一原発の一号炉はメルトダウンを起こし、原子炉から漏れ出した約35トンのウラン燃料は、これも一緒に溶融した周りの物質と混じり合いきわめて複雑な化学組成の物質（デブリ）を創り、原子炉格納容器下部に溜まっていると思われるが、詳しい状況は極度に高い放射線のため直接観測は不可能で、実態は分からない。

シカゴ大学の研究者らが天然原子炉の可能性を無視したのは、現在の鉱床ウランに含まれる水の量に基づいて計算を行い（ウラン核分裂連鎖反応を起こすには、ウラン原子のまわりに十分な量の水の存在が不可欠である）、核分裂連鎖反応の「延焼」を推定した結果であった。他方、自然界でウランが鉱床として形成される際には、ウランはまず岩石中から徐々に水に溶解し出し、そうして集まってきた水の中で沈澱堆積しウラン鉱を形成した、という点に黒田は注目した。つまり豊富な水の存在はウラン鉱床形成に不可欠の条件であった。さらにウランの鉱床の中には形成年代が古いものがあり、この二つの条件が重なるとウラン核分裂連鎖反応がより起りやすい状態になる。

ウラン鉱床の古さが問題になる理由を説明しよう。現在、天然に存在するウランは、ともに放射崩壊する二つの同位体ウラン235とウラン238を含み、その割合は約1対138である。このうち核燃料になるのはウラン235で、ウラン238は燃料には使えない。従って原子炉の燃料として用いるにはウラン235の割合を人為的に増やしておく必要がある。これがいわゆる濃縮ウラン燃料と呼ばれるものである。しかしウラン235の放射崩壊半減期はウラン238の7分の1と短い

（約7億年）ので、古いウランほどウラン235の相対

的な割合が高くなる。たとえば20億年前に遡ると、その割合は現在の約3.7倍となり、現今原子力発電に用いられている濃縮ウラン燃料のウラン235濃縮度にほぼ近い値となる。したがって、福島第一原発一号炉のメルトダウン・デブリウランが置かれている環境は、豊富な水の存在、そしてウラン235の濃縮という、核分裂連鎖反応を起こす二つの重要な因子が高くなり、「オクロ天然原子炉」の環境に、より近づくことになる。

黒田の提起した「天然原子炉」は、福島原発事故の今後の処理に科学的側面から大きな教訓を与えてくれる。福島第一原発一号炉のメルトダウンした燃料デブリが不幸にしてもう一つの「オクロ天然原子炉」にならない事を願い、黒田の遺訓を活かして、この深刻な問題に一刻も早い対応を訴えたい。

（おじまみのる・地球惑星科学）