



六ヶ所村次世代エネルギーパーク

(環境科学技術研究所, 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所, 青森県量子科学センター)

上 蓑 義 朋

Uwamino Yoshitomo

1. 六ヶ所村へ

(公財) 環境科学技術研究所 (以下「環境研」) の島田義也理事長 (当時) が日本アイソトープ協会の理事を兼務してくださっていることから見学をお願いしたところ、環境研だけでなく、(国研) 量子科学技術研究開発機構 (以下「QST」)・六ヶ所フュージョンエネルギー研究所 (以下「六ヶ所研」) と青森県量子科学センター (以下「QSC」) の3研究所をセットで案内してくださることになった。

5月の連休明けの金曜日、朝7時前に川越の自宅を出て大宮経由にて東北新幹線に向かってところ、11時前に七戸十和田駅に着いた。さわやかな青空の下、1人で乗合タクシーに乗り、正午前には環境研正門近くの商業施設リープで昼食をとることができた。「六ヶ所村」でイメージしていたよりもずっと近いことを実感した。

リープはスーパーマーケットやフードコート、銀行のATM等が入った施設である。休憩エリアには資源エネルギー庁による六ヶ所エネルギープラザがあり、「なるほど! ほうしゃせん」から「六ヶ所村の再処理工場の安全性」「日本のエネルギー政策」等、様々なポスターやデジタルサイネージが展示されていた。六ヶ所村観光協会による「六ヶ所村次世代エネルギーパーク」のポスター (写真1) には「見学予約受付中」の案内もある。大規模な原子力施設である使用済核燃料の再処理工場を抱える村ならではの



写真1 商業施設リープ休憩場所のポスター

の理解促進への取組みがうかがえた。

2. 環境科学技術研究所

環境研の正門に向かってまず印象的なのは、緑に囲まれた明るい赤煉瓦色の3階建ての本館である (写真2)。3階の役員室に向かい、まず島田理事長から環境研の概要をうかがった (写真3)。環境研は地元の要望に沿って設立された経緯から、地元役に立つ研究に力を入れているということである。これは運営資金が青森県を經由して交付されていることから、役立っていることが分かりやすい成果を出すことが重要なのだと思う。

環境研には過去3回本誌から訪問しており (小木



写真2 環境科学技術研究所本館



写真4 水生生物実験室の水槽を背に、左から植田部長、筆者、島田理事長、石川研究員



写真3 環境研・島田理事長(左)から概要をうかがう



写真5 生態系実験施設屋上から見える再処理工場の排気塔

曾洋一氏 [1995 年 3 月号], 関李紀氏 [1999 年 9 月号], 島田義也氏 [2004 年 3 月号]), 全天候型環境シミュレーション施設や閉鎖系実験室等の大型施設は既に紹介していることから、今回は主にそれ以降の施設や研究成果を案内していただいた。

最初に見学した水生生物実験室では、ヒラメを対象とした $^3\text{H}(\text{T})$ に着目した移行実験の結果を植田真司環境影響研究部長からうかがった(写真4)。HTOの生物半減期は短い、有機結合型(OBT)では長く蓄積するので影響が大きい。実際の実験は $^3\text{H}(\text{D})$ を使って行われたが、ヒラメの筋肉に取り込まれたDの濃度は曝露した海水の濃度に比べ、最大でも1/4を超えず、排泄についても生物半減期は7℃で424日、23℃で72日であった。 ^3H の海洋放出は福島第一原子力発電所からのALPS処理水でも注目されていることもあり、結果は新聞に取り上げられた。

六ヶ所村で再処理工場を建設中の日本原燃(株)の資料には、操業に伴って放出されるRIによる周辺住民の被ばくは最大でも年間 $22\mu\text{Sv}$ とある。原因となる主要な核種は、大気放出では ^{85}Kr , ^3H , ^{14}C , ^{129}I + ^{131}I , 海洋放出では ^3H , ^{129}I + ^{131}I となっている。

写真5の中央やや左寄りに映る煙突は、本館と同じ敷地内の生態系実験施設屋上から見える再処理工場の排気塔である。環境研は再処理工場の北東に位置し、尾駁(おぶち)沼をはさんではいるが隣接しており、風向きから最も強く大気放出の影響を受ける。島田理事長は、「地元には私たちがとどまっている限り村は安全ですよと言っている」と冗談交じりで話されていた。写真5を撮った屋上には大気のサンプリング機器が並んでおり、実験室では多数のカラムが並んだ分析装置が動いていた(写真6)。大気以外についても、環境研ではOBTの分析については国内随一の精度を有しているとのことである。



写真6 大気³H分析装置

内部被ばくの防護には植物に関する研究も欠かせない。二酸化炭素制御植物栽培チャンバー2台と¹³CO₂曝露用のチャンバーが1台あり、温湿度、日照等を制御して栽培実験ができるそうである。屋外では区画圃場（ライシメーター）が整備されており、移行低減化等の研究も行われている。

尾駿沼の周囲を1/4ほど南東方向に向かったキャンパスに先端分子生物学研究センターがある。ここではマウスや培養細胞を用いて、遺伝子やタンパク質のレベルから細胞、個体のレベルまでを対象に、低線量／低線量率放射線の生物影響を研究している。生物影響研究部・小村潤一郎主任研究員がポスターを使って説明してくださった（写真7）。

環境研には2つの施設に低線量率照射室があり、低線量生物影響実験施設（本館と同じ敷地内）では¹³⁷Csのγ線を1日（22時間、2時間は飼育作業のため照射停止）当たり100, 20, 1, 0.05 mGyの線量率で照射できるとのことである。先端分子生物学研究センターの線量率はそれより若干高く設定されている。

オス、メスのマウスをそれぞれ2000匹用い、0.05 mGy/日（総線量は20 mGy）、1.1 mGy/日（同400 mGy）、21 mGy/日（同8 Gy）の照射群と非照射の合計4群を死ぬまで飼育するという実験をしたところ、平均寿命については、オスでは1.1 mGy/日までは対照群と差がなかったが、21 mGy/日では平均寿命が対照群の913日から812日に減ったとの結果



写真7 先端分子生物学研究センターにて、左から小村主任研究員、筆者、高井副主任研究員、島田理事長

であった。一方メスでは1.1 mGy/日からわずかではあるが差が見え、対照群の861日に対して840日、21 mGy/日では741日になったとのことである。メスでは卵巣腫瘍の影響があり、同じ臓器でも性によって感受性が異なるという結果が得られている。ただしオス、メス共に死因の割合については照射による違いは見られなかった。うかがっていて、国際宇宙ステーションでは1日約1 mSvの被ばくと記憶していたが、現状の管理されている滞在日数では気にするレベルではないことが理解できた。しかし月面や火星旅行となると厳しそうである。

細胞にγ線又は³H水(HTO)を用いて約5 mGy/日から200 mGy/日の照射（総線量はいずれも200 mGy）をして突然変異（*HPRT* 遺伝子）の誘発頻度を調べた実験では、10 mGy/日までは影響はほぼ見られないが、20 mGy/日になると明らかに増加し、それより高い線量率ではほぼ平坦であった。実験からは線量率しきい値が示唆されるが、メカニズムの解明はこれからとのことである。

環境研では、再処理工場に対して地元住民が心配する放射線被ばくについて網羅して取り組んでいることを知り、地元に関与する研究所をめざしていることを実感した。またICRPが示す一般人に対する被ばく限度はもちろん、職業人に対する値や参考レベルについても、影響が検知できそうもない値であることを再確認した次第である。筆者も含め多くの人に関心のあるのは低線量／低線量率の被ばくである。しかし、その疑問に直接答えるための研究は相当な予算と人手が必要であり、また1つの論文を出すにも長期間の研究を要する。現在多くの研究所で

は、数年で任期が切れて次の就職先を探さねばならない任期付きの研究員の割合が多く、また短期間でポジティブな結果が出そうなテーマでないと獲得しにくい競争的資金で支えられている。そのような状況では低線量／低線量率の生物影響に関する研究は取り組みにくい。環境研では青森県を通じて定常的に予算が得られているからこそ、必要な研究ができているのだと思う。

3. 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所

車で環境研を後にし、10分程度で六ヶ所研に着いた。建物群はいかにも工学系の研究所という雰囲気である。

はじめに鈴木哲副所長から、QSTの概要と六ヶ所研が占める役割について説明いただいた。図1はQSTの活動を解説するイラストであるが、上部中央のドーム内に丸く光っているのが六ヶ所研が研究する核融合炉である。円形のトカマク型として最大の実験炉ITERは、日本をはじめ各国が共同で南フランス（サン・ポール・レ・デュランス）に建設中である。日本には茨城県のQST・那珂フュージョン科学技術研究所にJT-60SAという同タイプの試験装置があるが、これは超高温プラズマの実現等、ITERの支援装置としての位置づけである。六ヶ所研はむしろITERの次を見据え、発電を行う原型炉の設計や、実用化のために欠かせない材料開発に必要な加速器の開発を行っている。なお、説明いただいた大きな部屋には巨大なスクリーンがあり、ITERの実験が始まった際には遠隔実験室として使われる予定とのことである。大勢の研究者が大量の計算機とスクリーンを前にして議論する様子を想像すると心が躍る。

核融合は磁場で閉じ込めたプラズマ内で生じる。この挙動の理解と制御は一筋縄ではいかないので、スーパーコンピュータ（スパコン）を用いたシミュレーションが欠かせない。計算の内容はうかがっても理解できないので、スパコン本体を宮戸直亮原型炉計画調整グループリーダーに案内いただいた（写真8）。現在のプラズマシミュレータは3代目であり、岐阜県土岐市にある核融合科学研究所との共同調達とのことである。高額な装置を存分に利用するための工夫と理解できた。大きな部屋の一部にややこちんまりと存在するように見えるのは、前の世代のスパコンに比べると大幅に小型化したためだそう



図1 量子科学技術研究開発機構（QST）の活動を解説するイラスト



写真8 スーパーコンピュータを背に左から筆者、宮戸グループリーダー、島田理事長

である。スパコンは思ったより静かで熱くなかったが、一部の装置は以前の技術のため、騒音と共に熱風が噴出していた。

核融合を用いた発電は、一部にはトカマク以外の技術を用いて数年先には実用化するように言われている。しかし核融合ではエネルギーの大部分は14 MeVという高速の中性子によって取り出されるため、大線量の中性子照射に耐える材料が不可欠である。筆者は、材料の問題が解決しない限り核融合発電の実用化は不可能であり、ハードルは極めて高いと思っている。材料開発のためには、核融合炉の運転期間に匹敵する量的高速中性子を照射できる装置が必要であり、前人未到の電流強度を有する加速器を開発する必要がある。そのための施設が国際核融合材料照射施設（International Fusion Materials Irradiation Facility：IFMIF）であり、求められる加速器の性能は40 MeVの $^3\text{H}^+$ イオンを125 mAの強度で

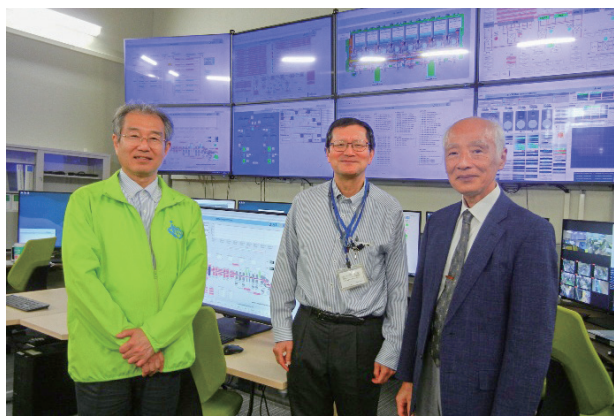


写真9 LIPAc 遠隔制御室にて左から島田理事長，長谷川部長，筆者

加速するものである。IFMIF では2 台の加速器からのビームを Li 標的に照射して中性子を発生させる。原型となる加速器は Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) と呼ばれ、六ヶ所研では日欧共同で開発したイオン源と RFQ 型の加速器で、5 MeV ではあるが強度は 125 mA を達成している。ビームの持つパワーは 625 kW であり、万一真空ダクト等に当たると瞬時に穴をあける強さである。長谷川和男核融合炉材料研究開発部長は物静かに説明してくださったが(写真9)，国際共同でこれを成し遂げたというのは、うかがった筆者にとっても誇らしい思いであった。

核融合発電に必要な燃料は ${}^2\text{H}$ と ${}^3\text{H}$ である。 ${}^2\text{H}$ は天然水中に無尽蔵にあるが、 ${}^3\text{H}$ は人工的に製造しなければいけない。1 回の核融合反応で得られる中性子は 1 個であり、これを ${}^6\text{Li}$ に捕獲させて 1 個の ${}^3\text{H}$ が製造できる。中性子は ${}^6\text{Li}$ に捕獲される以外に、外部に逃げたり他の核種に吸収されたりするので、持続して発電するためには中性子の数を増やす必要がある。核融合反応の中性子のエネルギーは 14 MeV と高いので、主に ${}^9\text{Be}$ の (n,2n) 反応によって増倍する。このため発電には Li と Be が必須であると森田健司主幹研究員からうかがった(写真10)。

Be はベリル（緑柱石）等を精製して得られるが、既存の手法では 2000℃ もの高温と高い毒性を有する粉塵の発生を伴う処理が必要である。六ヶ所研では化学処理とマイクロ波加熱を利用することにより、250℃ 以下の加熱で済み、省エネで安全性も高い技術を開発しているとのことである。

現在、Li は主に南米で産出されるが取り合いの状態である。一方海水中には 2300 億 t もあるそうで、

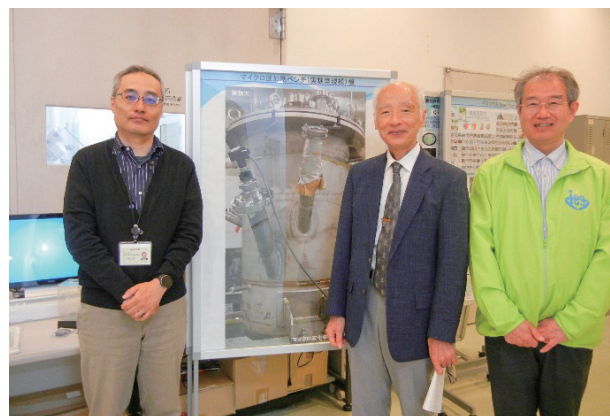


写真10 Be や Li の精製技術を説明するパネルの前で、左から森田主幹研究員，筆者，島田理事長



写真11 実物大の TBM のパネルを背に左から島田理事長，大石技術員，古賀研究員，筆者

もし海水から取り出すことができれば資源の問題は一気に解決する。六ヶ所研ではそのためのセラミック膜を開発中のことである。現状では海水から得るには経済的にまだ成立しないが、リチウム塩湖から少ない環境負荷で取り出すことや、使用済 Li 電池から高純度の Li を回収することは既に可能とのことであった。Li はもちろん、Be も銅合金として電極や防爆工具等に使われており、社会に必須の材料である。すぐに役立つ技術の開発が核融合の研究所で行われているとうかがい心強かった。

核融合反応で得られるエネルギーの約 8 割は中性子に配分される。そのため核融合炉では、プラズマから出てくる高エネルギー中性子を受け止め、発電のために熱を取り出すと共に、Be で中性子数を増やし、 ${}^6\text{Li}$ で ${}^3\text{H}$ を生産する必要がある。古賀友稀研究

員から、この複雑な役目を担うのがブランケットであり、日本の設計では高温高压の水と Be（金属）、 ${}^6\text{Li}$ （セラミック）が内包されると説明いただいた（写真 11）。計画どおりの性能を発揮し安全性を確認するための試作機（Test Blanket Module: TBM）を製作し、フランスで建設中の ITER に組み込んで試験する予定である。数か国の TBM が試験されることで、日本の技術の高さが示されることを期待した。

4. 青森県量子科学センター

QSC は六ヶ所研の真向かいである。玄関で松平寛友施設長が出迎えてくださった。名刺をいただいた直後、(旧)放射線医学総合研究所の所長をされておられ、日本アイソトープ協会から出版している ICRP 報告書の翻訳もされていた松平寛通先生と 3 文字まで同じなので、つい「私が最初に就職した放医研の……」とつぶやいたところ、「息子です」とおっしゃられ、御父上の穏やかなお顔を思い出すと共に、施設長が身近に感じられた。

松平施設長から全体の説明をうかがった後、見学のために管理区域に向かったが、床がどこもピカピカで清潔に保たれており、管理区域受付の様子等からも、利用者である研究者はお客さまという雰囲気を感じられた。

最初にサイクロトロンを見せていただいた。陽子又は重陽子をそれぞれ 20 MeV、10 MeV まで加速できるということで、多くの病院にある PET サイクロトロンよりもやや大きいイメージであった（写真 12）。ここでは PET 核種を製造するだけでなく、細胞やマウスを用いたホウ素中性子補足療法（BNCT）の研究用ポート、中性子透過画像用の横向きと垂直の 2 つのポート、微量元素分析用の PIXE のポートと、盛りだくさんな実験ができるビームラインが整備されていた。

PET 核種としては、 ${}^{18}\text{F}$ の他に ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{N}$ 、 ${}^{15}\text{O}$ も製造可能であり、薬剤の合成装置、患者用の PET/CT 装置、動物用の PET/MRI 装置も整備されている。

帰りの乗合タクシーで岩手医科大学から QSC に実験に来ておられた先生と同乗した。以前、岩手県滝沢市の日本アイソトープ協会の施設に PET と PIXE の装置があったが、老朽化と役割終了のために数年前に廃止した。以前先生は協会の施設を利用さ



写真 12 サイクロトロン室にて左から松平施設長、筆者、島田理事長

れていたそうである。若干遠くて不便にはなったが QSC で研究が続けられているとうかがい、安心した。

5. おわりに

六ヶ所村は次世代エネルギーパークとして自らを位置づけている。村内には大きな工場である再処理施設が操業直前であり、今後国内の原子力発電所のバックエンドを支えることになる。六ヶ所研はまさに次世代のエネルギー開発であり、環境研、QSC はそれらの安全性を横から支えている。村内には広々としたメガソーラーが複数あり、見渡すと大きな風車が林立している。更に日本の第 1 号の石油備蓄基地があり、日本の石油消費量の約 1 週間分を蓄えているそうである。現在から未来を支える村として、エネルギーパークはふさわしい名前だと実感した半日であった。

謝辞

駆け足の見学に対し、待ち受けて簡潔に説明してくださったそれぞれの施設の先生方に深く感謝いたします。何よりも、半日ずっと付き添ってくださった環境研の島田理事長には感謝しきれません。見学のアレンジと当日の各先生方への連絡、公用車の運転までしてくださった環境研・総務課の向井香緒里氏にも深く感謝いたします。

(元(公社)日本アイソトープ協会)