

2009年度柴田賞受賞記念論文

Golden Age Determination

—— 熱水鉱床の Te-Xe 年代測定への道 ——

高岡 宣雄*

(2010年2月9日受付, 2010年4月8日受理)

Golden age determination

—— A way to the Te-Xe dating of hydrothermal deposits ——

Nobuo TAKAOKA *

* Kyushu University (Emeritus Professor)
Koyo-dai 6-3-8, Fukutsu-shi, Fukuoka 811-3223, Japan

From experimental and historical points of view, the author reviews his works on the technical development for isotopic studies on ultra-micro amounts of noble gases, and the determination of ^{130}Te double beta-decay half-life, which enables us to date hydrothermal deposits, in particular for gold telluride minerals. In addition, he describes his experiences of terrestrial and extraterrestrial noble-gas studies, and founding a new SIMS-laboratory in Kyushu University for extraterrestrial samples as well.

Key words: noble-gas mass-spectrometry, ^{130}Te double β decay, Te-Xe dating, earth and planetary matters

1. はじめに

昨年、私は学会から予想もしなかった立派な賞を頂いた。受賞講演でテルルを含む熱水鉱床の年代測定について話したが、 ^{130}Te のダブルベーター ($\beta\beta$) 崩壊の研究は大学院での私の研究テーマだった。その後地球惑星物質の研究が私の研究テーマに加わったが、 $\beta\beta$ 崩壊は今も私にとって最大の関心事である。懇親会の席で学会誌「地球化学」の編集長から、若い世代の会員のためになるような話を会誌に書くように依頼された。これは難しい注文だが、何か書かねばならないかと観念して引き受けた。しかし妙案があった訳ではない。思案の末、説得力があるのは自分の経験にもとづく話しかないと思ったので、それに的を絞って書くことにした。

私が修士課程で $\beta\beta$ 崩壊の研究を始めたとき、日本

には極微量の希ガスの同位体比を測定できる装置がなかったので、研究を進めるためには極微量の希ガスの同位体比の測定と定量を行なう技術の開発が不可欠だった。従って、 ^{130}Te の $\beta\beta$ 崩壊の研究の歴史は、極微量希ガスの同位体比分析技術の開発の歴史と重なっている。また私は、2年間の国外留学を挟んで、36年間に3つの大学で研究・教育を経験した。若い頃の極微量希ガスの同位体分析に関する新技術の開発の経験は、次の世代の人達の役に立つかも知れない。また新たに転勤した大学に新しい研究室を立上げる経験は、将来、新しい地に新しい分野を拓こうと考える人にとって、何かの役に立つのではないかと考えた。

テルル鉱物は金鉱床の重要な含金鉱物であり、また金を含まない場合でも他の金鉱物と共生する。テルルを利用した金鉱床の年代測定を行なうためには、 ^{130}Te の $\beta\beta$ 崩壊半減期が不可欠である。 ^{130}Te の半減期はまだ最終的に確定されていないが、物理学者によるカウンター実験 (e.g., NEMO-3) の結果が発表され始めたので、 ^{130}Te の半減期が決定されて Te-Xe 年代測定法

* 九州大学 (名誉教授)
〒811-3223 福岡県福津市光陽台6-3-8

が実用化される日もそう遠くないだろう。NEMO-3の結果 (Barabash, 2008) は、私達が Te 鉱物を使って求めた¹³⁰Te の $\beta\beta$ 崩壊の半減期と誤差の範囲で一致している。

$\beta\beta$ 崩壊は、M. Goepfert-Mayer (1935) によって75年前に予言された。このテーマは、それ以来理論・実験両面からいろいろ研究され、現在も NEMO-3 のように、半減期の測定とニュートリノ質量の決定を目的にした研究が活発に行なわれている。私が生まれたのはダブルベータ崩壊の予言の2年後で、私は今“golden age”とあってよい年齢になった。 $\beta\beta$ 崩壊研究の歴史も golden age である。以下の拙文では、golden age に3重の意味を込めて、極微量の希ガス同位体分析法の開発、¹³⁰Te $\beta\beta$ 崩壊半減期の決定とそれに基づく金鉱床の Te-Xe 年代測定 (golden age determination) を目指す研究を軸に、筆者の地球惑星化学への関わりについて述べる。

2. 大阪大学時代 (1960~1979年)

2.1 緒方先生との出会い

1960年、大学4年生になり卒業研究のために緒方惟一先生 (故人) の研究室に配属された。当時も現在と同様、学生の希望に基づいて配属先が決められていたと思うが、どの様な理由あるいは動機から緒方研を希望したのか、記憶をたどっても思い出せない。こんな研究がしたいというような真っ当な理由ではなく、“多くの人のすることはしたくない”という天の邪鬼な私の性質のためではなかったかと思われる。当時は、物性物理や原子核・原子力物理などが花形だった。“質量分析器” (mass spectrograph) を使った原子質量の測定が緒方研究室の中心的な研究テーマで、高感度の希ガス“質量分析計” (mass spectrometer) で新しい研究を始める計画があるとは知らなかった。たまたま入ったところ、非常に稀なチャンスに巡り合ったということだろうか。卒業研究のテーマは“ノズル噴射によるガスの分離”で、ネオンガスをノズルから真空中に噴射した時に起こる同位体分別を質量分析で確かめることだった。ノズル噴射による同位体分別は圧力勾配による拡散 (圧力拡散) によって生じる。ご存知のように、拡散には濃度勾配による拡散、圧力勾配による拡散、および温度勾配による拡散がある。卒業研究は $\beta\beta$ 崩壊とは無関係だが、私にとってこれは最初の希ガス質量分析であり、大学院での研究への第一歩として重要な意味をもつので、簡単

に述べたいと思う。

実験を直接指導して下さったのは、当時助手だった岡野純先生 (故人) だった。理学部の金工室で真鍮製のノズルと円錐形をしたガス流の分離器を作ってもらい、それを軟質 (ソーダー) ガラスで作った真空ラインにピッチ (一種の接着剤) でくっ付けて実験した。軟質ガラスの細工では、経験した人なら分かるように、丁寧な加熱・なまし、間延びしない手際よい作業など、硬質ガラスでは経験しない注意深い取り扱いが必要である。加熱時間が長くなると起こる失透や太いガラス管の曲げなどで苦勞したが、これに馴れることによって私のガラス細工の腕は確実に上達した。後に硬質ガラスを自由に使えるようになると、いろいろなシステムを手作りしたし、約10 cm 径の硬質ガラスを使って、マクレオード真空計 (McLeod gauge) を手作りにしたこともある。卒業研究で習得したガラス細工のテクニックは、1975年にステンレス製のガス抽出・精製系を作るまで大変役に立った。

分離器の円錐の中心の穴を通り抜けたガス流と、外側に分離されたガス流を別々にガラス瓶に集めて、研究室に設置されて間もない希ガス質量分析計を使ってネオンの同位体比を測定した。結果はノズルの直後約0.9 mm のところで分別が最大になり、分離器の外側に拡散したガスは、分離器中心の穴を通り抜けた流れに比べて、²⁰Ne が約4%濃縮していた。この測定が私の希ガス同位体比分析の最初の経験だった。“極微マス”とよばれるようになったこの質量分析計と出会うきっかけになった卒業研究は、その後の私の人生の方向を決めた重要な一里塚である。この質量分析計は、その後30年間 (1990年まで) 故障することなく稼働して、¹³⁰Te の $\beta\beta$ 崩壊の研究だけでなく、地球希ガスと隕石希ガスの同位体比研究に大きな貢献をした。

2.2 ダブルベータ ($\beta\beta$) 崩壊との出会い

1961年、阪大大学院 (物理学専攻) に入学したとき緒方先生から言われたのは、¹³⁰Te の $\beta\beta$ 崩壊の半減期を質量分析計を用いて決める仕事だった。私は、 $\beta\beta$ 崩壊という原子核崩壊過程があることを知らなかったし、その半減期が 10^{21} 年という想像を絶する長さであること、更に地質鉱物と質量分析計を使ってそれを決めることなど、全く初めて聞くことばかりだった。修士課程の2年間でこのような大仕事をまとめることが出来るかどうか、深く考えることもなくこれを研究テーマに選んでしまった。自信などあった訳がないので、ただ単に楽天的で能天気な性格のためだろ

う。この仕事は下手をすると袋小路に入ってしまうかも知れない、と緒方先生は心配しておられたことを後になって聞いたことがある。ご心配は妥当だったと思うが、このテーマを与えて下さったことに感謝している。修士課程でも直接実験を指導して下さいしたのは岡野先生だった。

半減期を決めるためには、 ^{130}Te の $\beta\beta$ 崩壊で生じた ^{130}Xe ($^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ で表す)の量を正確に測定する必要がある。現在では、質量分析計の感度の安定性がよくなったので、試料(テルル鉱物)を真空炉で加熱・溶解して分離したキセノン同位体のピークハイトと同位体比から、いわゆる感度法で $^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ を定量するのが普通である。しかし当時は感度の再現性がそれ程よくなかったために、定量には同位体希釈法が使われていた。1億年前にできたテルル含有量30%の鉱物を10g使うと仮定して、鉱物中に蓄積している $^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ の量を見積もると、約 $1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ (Standard Temperature & Pressureの略; 約 3×10^8 原子に相当)になる。この $^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ 量を同位体希釈法で正確に求めるためには、できるだけこの量に近いスパイク(定量用の標準ガス)を用意する必要がある。更に、スパイクとして使うキセノンガスの同位体比は、試料から出てくるガス($^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ と大気起源キセノンの混合ガスがベースだが、他にテルルの(n, γ)反応やウランの核分裂起源のキセノンなどを含むことがある)の同位体比とできるだけ大きく異なることが望ましい。ヨウ化カリウム(KI)を中性子照射して作った ^{128}Xe を用いることになった。 $10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ のスパイクを作るためには、スパイクを封じ込めるアンプルの体積を約 1 cm^3 として、 ^{128}Xe の圧力を 10^{-8} Torr (10^{-6} Pa)以下にする必要がある。当時、このような超高真空の“絶対測定”は不可能だった。

10^{-8} Torr 以下の ^{128}Xe 分圧を測定しないで済ますために、まず $10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ オーダーの大気キセノンのスパイクを作り、これを用いて ^{128}Xe スパイクを逆定量することになった。これなら 10^{-4} Torr (10^{-2} Pa)オーダーの圧力を測定すればよい。この測定には、マクレオード真空計と質量分析計を使ってキャリブレーションした、クヌーセン真空計(Knudsen gauge)を使った。クヌーセンゲージは、Fig. 1に示したように、白金板で作った小さな円筒に縦に切れ目を入れて約10枚の羽根を作り、円筒の内側にニクロム線を封じた熱源を置く。この円筒を細い針金で吊るして、直径約5cmのガラス管の中に封じ込めたものである。真空を測る

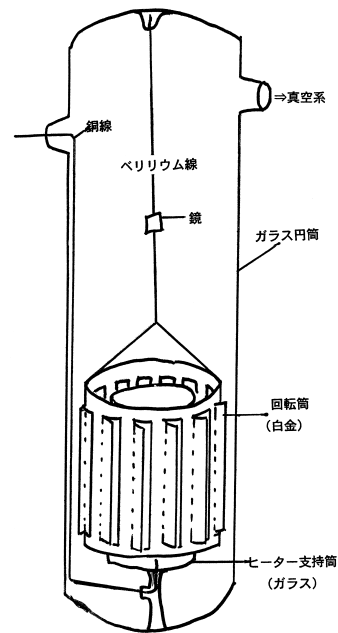


Fig. 1 クヌーセン真空計 (Knudsen gauge)

ときには、ヒーターを加熱しガラス管全体は水で冷却する。ヒーターがある内側から羽根に衝突する原子・分子の熱運動の速度は、冷却された外側からのものに比べて大きいため、円筒には回転力が生じる。針金に付けた小さな鏡に光を当てて、離れた場所にセットした目盛り上の光点の移動距離から圧力を求めた。使用したクヌーセンゲージの感度は $1.34 \times 10^{-6} \text{ Torr/mm}$ で、出来上がった大気キセノンスパイイクの量は、 $3.9 \sim 8.5 \times 10^{-7}$ ($^{130}\text{Xe} = 1.0 \sim 2.3 \times 10^{-7}$) $\text{cm}^3 \text{ STP}$ だった。記念すべきこのクヌーセンゲージは大切にしていたが、4度目の引っ越し(山形から福岡)で壊れてしまった。

中性子照射したKI試薬(5g)を中性子照射のためのアンプルから取り出して石英管に入れ、ガス抽出ラインの電気炉で加熱して ^{128}Xe ガスを抽出する訳であるが、当時のガス抽出ラインは硬質2級(モリブデン)ガラス製で、現在のようなメタルバルブはなく、代わりにラインの要所々々をU字形に曲げて、そこを水銀で満たしたり空にしたりさせてラインの開閉を行っていた。水銀の上げ下げは、水銀溜めの圧力を調節して行なうので、ラインを大気圧から真空に排気する時やライン内へ大気を導入する際には、常にライン内の圧力と水銀溜めの圧力を平衡させる必要がある。これに失敗するとライン内に水銀が飛散し、下手をするとガラスを割ってしまう危険があった。水銀を

使うことによるもう一つの大きな問題は、その蒸気圧（常温で約 10^{-3} Torr）のために、イオンゲージのような高感度の真空計が使えないことである。ガラス細工のピンホールはテスラーコイルを使って探し、それでは検出できないクラックなどからの漏れは、排気を止めて一晩置いてから、ラインの各部分の圧力をマクレオードゲージで測ってチェックした。サンプルからのガス抽出時の圧力モニターには、ピラニゲージやサーモカップルゲージを利用した。ガラス製のラインだから、当然、無人の終夜運転など出来ない。根気と忍耐の作業だった。最初に作った ^{128}Xe スパイクは体積約 $1.5\sim 2\text{ cm}^3$ のアンブルにつめ、その中の1本を使って、大気キセノンスパイクで ^{128}Xe 量を定量して圧力を求めた。得られた ^{128}Xe スパイク量は、アンブルの体積によって変るが、 $1.74\sim 2.08\times 10^{-9}\text{ cm}^3\text{ STP}$ で、 ^{128}Xe の同位体存在度は95.3%であった。これは当初見積もった ^{130}Xe 量の約100倍である。

ガス精製に使うゲッターも現在のものに比べると極めて初歩的で、最初はカルシウムメタルおよびチタンとタングステンのフィラメントを使った。カルシウムは反応性が大変高くてよいのだが、空気中では勿論、保存容器の中でも酸化される。使用する直前にカルシウムを石英管に入れて真空中で加熱蒸着させて精製したが、炉の温度を下げるとカルシウムが内部に蒸着した石英管が剥離を起こして割れるので、内部に石英のスリーブを入れて外側の石英管の破損を防いだ。テルル鉱物からのキセノンガス精製の際にもその恐れがあった。本当に神頼みに近い実験だった。更にキセノンガスの精製を行なうために、TiとWフィラメントを封入したアンブルを手作りして、質量分析形に導入する直前に再度精製を行なって完全を期した。

大谷鉱山および河津鉱山産出のテルル鉱物をそれぞれ18gと28g使ってガスを抽出・精製して質量分析した。大谷鉱山テルル鉱物に対しては、 ^{130}Xe 同位体存在度の過剰から $^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}=2.2\times 10^{-11}\text{ cm}^3\text{ STP}$ を得た。しかし河津鉱山Te鉱物からは明確な ^{130}Xe -excessは検出できなかった。大谷鉱山テルルに対して、鉱山の岩石から分離した黒雲母を使って、K-Ar年代測定を行なった。Arの定量には ^{36}Ar スパイク（ $^{36}\text{Ar}=24.4\%$ ）を使用した。黒雲母の分離とK濃度の測定は東北大の植田先生のご好意によるものだった。得られたK-Ar年代（125 Ma）と $^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ 量から ^{130}Te の半減期（ 1.4×10^{21} 年）を計算して、無事に修士課程を修了できた。院生の私がこれだけのことが出来たのは、指

導教官の先生方の適切なご指導のお蔭である。

修士課程での研究は私の人生の方向を決めた。納入されて間もない極微希ガス質量分析計の立ち上げを目の当たりにしただけでなく、自らもその一端に関わったことは大きな自信につながった。極微希ガス質量分析計の立ち上げの過程では、(1)“静作動”に耐える超高真空を達成すること、(2)分析計の感度を上げること、(3)質量分解能を上げることなど解決すべき課題があった。超高真空については質量分析計の設計段階から考慮が払われていた。ガスケットはアルミ製で、現在使われている無酸素銅のガスケットには劣るが、無人運転で終夜 150°C の焼き出しが出来た。忍耐強く装置の焼き出しと排気を繰り返し、装置の内部を汚さないように注意した。実験室を土足・飲食禁止、禁煙にしたのは岡野先生の発案だった（緒方先生も岡野先生も大の愛煙家だった）。実験室はしばしば電気掃除機をかけ、時々モップで磨きかけた。このときの習慣が身について、私は仕事を始める前に部屋を掃除して（自分の気持も）整理するのが習わしになった。修士論文提出の頃（1963年）の質量分析計の到達真空度は 5×10^{-9} Torrだった。この真空度は当時としては非常に低いものだったと思う。

感度を上げるために2次電子増倍管が必要だったが、適当なものがなかったので作る必要があった。必要なものが手に入らなければ自分で作る。これは緒方先生の信条だった。Astonが自作の質量分析器で原子質量を測定して、ノーベル物理学賞に輝いた話は何度か聞かされたことがある。学生の私は2次電子増倍管製作にまつわる詳細を知らなかったが、色々な人の協力があったのだろうと推測する。最終的に三菱電機が作った2次電子増倍管を使用した。質量分析計の分解能は当初140程度であった。到達真空度は 5×10^{-9} Torrという非常に低い値だったが、油拡散ポンプを使っていたこともあり、2次電子増倍管を使って感度を上げると、キセノンの質量領域に炭化水素イオンの小さなバックグラウンドピークが見えた。これを質量分離する必要があったが、感度を落とさずに質量分解能をあげて分析できるようになったのは博士課程に進んでからのことだった。

阪大理学部には地質学や天文学のような自然現象を研究教育する講座がなかった。そのため私は地質学や天文学の授業を受けたことがない。緒方先生はこの状態を憂えて、早くから地球科学や宇宙科学の教育が出来る組織の必要性を考えておられた。しかし阪大に宇

宙地球科学科ができたのは1995年だった。他方、1960年当時、日本の地球物理学や地質学の研究者は、外国で実用化され始めた放射年代測定を日本でも行ないたいと強く望んでおられた。私が緒方研に入った頃には、地球物理学・地質学などの研究者が参加する地質年代測定の研究会があり、私は先生の抱持ちとして参加させていただいた。色々な先生方がおられたが、今も強く印象に残っている光景の一つは、一人の先生（後に九大の松本達郎先生（故人）と知った）が自信に満ちた口調で化石のお話をされているお姿である。地質学を学んだことのない私は、そのとき大変な違和感を感じた記憶がある。放射年代測定の活動の中心になられたのは東北大の河野義禮先生（故人）で、グループの植田良夫先生（故人）が大阪中之島の理学部に來られてアルゴンの質量分析を実習された。お昼に理学部の近くにあった料亭（竹葉亭）で鰻重をお相伴させていただいたのでよく覚えている。先生は仙台で質量分析計を立ち上げて、本邦初の本格的な花崗岩の K-Ar 年代測定を行なった。後々、河野研究室の方々、特に植田先生には大谷テルル鉱物などの入手や選鉱・化学分析で大変お世話になった。

1961年、第2室戸台風が大阪に上陸して中之島一帯が水没し、理学部の地階も胸の辺りまで水に浸かった。地階にあった大型マスやその他の大型装置は水没したが、私の使っていた希ガスのマスは2階にあったので難を免れた。結局、理学部は石橋キャンパスへ移転することになって、博士課程1年（1963年）のとき移転が始まった。希ガスマス実験室の移転は最初だった。全体的に実験室が先に引っ越したので、学生は勿論ほとんどのスタッフはまだ中之島キャンパスに残っていた。私はマスと一緒に先に新しい実験室に引っ越した。運送業者は部屋の中に装置を置いて行ったが、手助けしてくれる人がいないので殆ど全てを一人で組み立てる羽目になった。マグネットなどの重量物は助けを借りた筈だが、どのようにして台の上にあげたのかほとんど記憶がない。覚えているのは、床が少し傾いていて分析計の傾きを修正するために、適当なジャッキがなくて、一人で持ち上げるのに苦労したことや、ばらばらにして運んだガラス製のガス抽出ラインやガス導入ラインの組立に苦労したことである。ガラスラインの組立には、卒業研究で苦労したガラス細工の経験が大変役に立った。何はともあれマシンは順調に回復してデーターを出せるようになった（Ogata *et al.*, 1964）。1966年までには、より正確なデーター

を出すために定量法などに改善を加えて¹²⁸Xe スパイクを新たに作り直し、大谷 Te に対して新しい半減期を得ることが出来た（Takaoka and Ogata, 1966）。そしてこれらが私の博士論文になった。

そうこうする内に世の中が大きく動き、世に云う大学紛争の波が大阪にも波及した。ある日突然、理学部も学生によって封鎖された。この頃、緒方先生は質量分析の国際会議開催（1969年、京都）の準備責任者をしておられ、当然、私もそれに巻き込まれていた。封鎖の直前に印刷業者から納入された国際会議関係の書類を部屋に残したままだった。参加登録した人にすぐに発送しなければならないので、封鎖学生に掛け合いに行ったところ、割合と物分かりがよくて無事に書類を運び出せたときはほっとした。無事に国際学会が終わった後も、まだ理学部で実験できる状態ではなかった。私は東大物性研究所の本田雅健先生の研究室で、ppb レベルのルテニウムの分離・定量法を教わるようになった。これは¹⁰⁰Mo の $\beta\beta$ 崩壊（生成核種：¹⁰⁰Ru）研究の予備実験である。立教大の原子炉で放射化して作ったルテニウムのトレーサー（¹⁰⁶Ru）を加えて、平瀬鉱山の輝水鉛鉱（MoS₂）からルテニウムを抽出した。抽出液を酸化して RuO₄ にし、蒸留法によって微量のルテニウムを分離・定量した（高岡, 1970）。ルテニウムの他に、石灰岩（CaCO₃）からチタンを分離して濃度を測定する方法も教わった。これは⁴⁸Ca の $\beta\beta$ 崩壊（生成核種：⁴⁸Ti）研究の予備実験だが、チタンの濃度が高くて全く使い物にならないことが分かった。この本田研での化学分析の実習は、化学知識の乏しかった私にとって大変よい経験だった。ここでは、本田先生はもとより、島（正子）さん、今村さん夫妻、西泉さん、海老原さんなど、多くの友人・知人を得た。

1970年、Max-Planck 化学研究所（Otto-Hahn 研究所; 西独マインツ）の Hintenberger 先生（故人）の研究室に留学した。Hintenberger 先生は緒方先生の友人だった縁で、阪大の極微希ガス質量分析計には、Hintenberger 研究室で使用されていた技術が採り入れられていた。私は鉄隕石と NASA がアポロ計画で採取した月の岩石の希ガス分析を行なった（Hintenberger *et al.*, 1971）。ヘリウムからキセノンまでの全希ガスの同位体比分析は初めての経験だったが、すぐに慣れることが出来た。研究所の実験室でガス抽出炉や精製ラインを見てこれは凄いと思った。抽出炉の炉心管はタンタル製、ラインは全てステンレス

製で、その製作加工はすべて研究所の工場で行なうと聞いてびっくりした。阪大理学部で金工室でタンタルの溶接など思いも及ばなかった。故障すると、工場のマイスターが部下を連れてやって来てすぐに直してくれた。工場には金属加工だけでなく、ガラス細工や製図など、マイスターに率いられた熟練工が沢山いた。私の2ヶ月後に島さんご夫妻が同じ研究室に来られて、島正子さんは隕石の研究をしておられた。ある時、ちょっと太いガラスの真空ラインが割れて修理を頼まれた。日本の貧弱な研究サポートの環境に慣れていた私は、気楽に引き受けて直したことがあった。このことが工場に知れたらしく、後日、ガラス工室のマイスターから、ガラス細工は面白いのかと皮肉を言われてしまった。以来この国では他人の職分を犯してはいけないのだ、と肝に銘じたことを記憶している。

1972年に帰国したが、帰国直後は使える予算が全くなかった。そこでドイツで考えていた Xenology の問題、すなわち隕石 Xe や月岩石中の太陽風 Xe の同位体比と地球 Xe の同位体比の間の系統的な違いが何故生じるのか、という謎を説明する仮説を考えた。ふと²⁴⁴Pu の核分裂起源キセノンを使えば問題が解けそうだとひらめいた。原始太陽系に共通の原始 Xe があったと仮定して実際にプロットしてみると、その同位体比を推定することができたので、太陽系に共通の原始キセノンを“primitive Xe”と名付けることにした (Takaoka, 1972)。現在では、星の中での p-process や s-process などによってできる様々な同位体比のキセノンを含む物質が同定され、隕石に含まれていることが知られている。そしてそれらの混合したものが太陽系の原始的なキセノンの同位体比の元になっていると考えられる。“primitive Xe” (又は U-Xe) を隕石や惑星物質の中で探す試みは成功していない。

同時に、Max-Planck 研究所で使ったステンレス製のガス抽出・精製系を作ろう、と考えて図面を引き科研費を申請した。最も重要なパーツは2000°Cに耐える炉心部である。最初モリブデン製のものを作ったが溶接が困難で、太いムク棒から炉心管とフランジを一体で削り出したものだった。これでは加工が大変で不便かつ高価なので、タンタル製の炉心管を作ってくれるところを探すことにした。どの様にして探したのかかすかな記憶しか残っていないが、東京の大森付近にそのような工場があると教えてくれたのは、東京教育大松尾研の院生だった鈴木昌さんではなかったかと思

う。彼は私がドイツに行く前から、阪大の研究室に来てアルゴンの分析を試みていた。タンタル炉心管を作ってくれるところが見つかり、科研費と武田科学財団の助成金を頂いて、新しいラインを作ることができた。これをβ崩壊の研究に使った希ガスのマスに接続して、ガスの抽出・精製・分析をオンラインで行なうことが出来る装置を作った。炉の空焼きとライン全体の焼き出し排気を繰り返して、装置のブランクを下げる努力をした結果、1975年3月時点のホットブランクは、⁴⁰Arで 8×10^{-9} 、¹³²Xeで $3 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ だった。またマスの質量分解能を上げることに努力した。その結果、感度は変えずに分解能が約500になり、ほとんどの希ガスピークを妨害イオンのピークから分離できるようになった (Takaoka, 1976)。このガス抽出・精製ラインをモデルに改良型のガス抽出炉や精製系が作られ、現在もあちこちの研究室で使用されている。

大学院で希ガス分析をやろうという学生 (長尾敬介さん) も現れた。1976年以降は、様々なサンプルを携えた人々も実験室においでになった。地球サンプルの最初は、兼岡一郎さんの南アフリカ産キンパーライト中の金雲母 (phlogopite) とカンラン岩 (peridotite) だった。これはかなり汚い試料でガスの精製にてこずったと記憶するが、He から Xe の元素組成と同位体組成の結果を出すことができた (Kaneoka et al., 1977)。1969年に南極隕石が日本隊によって発見・回収されてから、隕石は私達にも手の届く存在になった。新しい装置で初めて分析した地球外物質は Yamato-73 隕石である (Takaoka and Nagao, 1978)。様々な試料を分析する機会があったが、最も印象に残っているサンプルは小嶋稔先生のダイヤモンドである。炭素の融点は3500°C以上だから溶かすのは無理である。図書室に行って調べると、イギリスの古い雑誌にダイヤモンドを真空中で加熱した報告が出ていた。1900°C近くまで熱すると、グラファイト化が始まることが分かった。グラファイト化で全てのガスが完全に放出されるかどうか分からないので、念のため2000°C以上で加熱できるように電気炉をちょっと改良した。Ta ヒーターは完全に絶縁されていたので、ヒーターの電位を約-100 Vまで下げることができ、また数Aのエミッション電流が流れても大丈夫な整流回路を手作りした。ヒーターからの輻射だけでなく、ヒーターから放出される電子を加速して炉心管に衝突させて加熱する積りであった。必要な部品は研

研究室のジャンクボックスにころがっていた。注意すべきことは、タンタル炉心管の温度が上がるとヒーターの温度が上がり、エミッションが増加してますます温度が上がるといふポジティブフィードバックが働くので、温度が上がり過ぎないように注意深くヒーターの加熱電流とヒーター電位を調節することだった。温度は簡単に2000°Cを突破した。最初、ガス放出を容易にするために、ダイヤモンドを砕いてアルミ箔に包みサンプルホルダーにセットした。タンタル炉心管を2000°C以上で充分に脱ガスした後、サンプルホルダーから試料をるつぽに落して恐る恐る加熱を始めた。1900°Cを越えた辺りでモクモクと体積が増えているらしいのが見えた。すると突然、真っ白に輝くダイヤモンドの破片(1~2 mm)が(多分ガスを噴きながら)飛び上がってきた。サンプルホルダーはガラスだったので、割れるのではないかと覚悟したが、その破片はガラス壁に当たり、そこに突き刺さったのにはびっくりすると同時に、割れなくてよかったと胸をなで下ろした。この一瞬の光景は今でもはっきりと覚えている。割れていれば空気が入り、タンタルや電極のモリブデンが燃えて大事故になったのかどうか、今でも想像がつかない。以後、サンプルは砕かない状態でゆっくり加熱してサンプルの飛散を防いだ。これは世界で初めてのダイヤモンドの希ガス同位体比測定だった(Takaoka and Ozima, 1978)

もう一つ印象的なのは、松代群発地震に関連するヘリウム同位体比の測定である。脇田宏さんを中心に、松尾禎士先生(故人)、野津憲治さんなどが松代の水田の中で採取したガスサンプルである(Wakita *et al.*, 1978)。分析計の質量分解能は500だったので ^3He と $\text{HD-}^3\text{H}$ を完全に分離でき、 He 同位体比の測定に難しい点は全くなかった。興味を引いたのは、地面から ^3He に富んだガスが出ていることだった。ダイヤモンドやキンパーライトなどは、地下深部のマントル付近から上がってきたサンプルであるのに対して、日本列島各地で松代のガスと同様の ^3He を含んだガスが地面から出ているのなら、 He は勿論、 He 以外の希ガスの同位体比はどうか知りたくなる。1976年に修士課程を終わり、博士課程に進んだ長尾さんにこれを調べてもらうことにした。彼は多くの試料を採取して分析して、地熱地帯での地中拡散に伴う希ガスの同位体分別や各地のヘリウムの同位体比分布を明らかにした(Nagao *et al.*, 1981a, b)。また、松尾先生が提供して下さった1958年から1977年にかけての昭和新山

の噴気ガスでは、ヘリウムの同位体比や He/Ne 比の経年変化がはっきりと検出できた(Nagao *et al.*, 1980)。分析法の進歩を見越して、火山ガスを20年間も保存した松尾先生の先見の明に感服する。

緒方研(緒方先生は1975年3月退官)は共同利用の施設ではないが、私は来るものは拒まずをモットーにできるだけ積極的に装置を開放して協力した。当時、マントル物質など高融点のサンプルに含まれている微量の全希ガス同位体比の分析が出来る所は日本にはなく、世界的にもほとんどなかった。私が地球科学の教育を全く受けたことがなかったのと、1976年に地球化学会に入れて頂くまで、私の参加する学会は物理学会と質量分析学会だけだったので、地球科学の課題は何か、その解決に希ガス同位体比の分析がどの様に役立つかなど知識がなかった。しかし未知のマントル物質は私の好奇心をかき立てた。また、 β 崩壊の研究では色々な方の協力と好意によって助けられたこと、学生の時に目の当たりにした年代測定研究会や、学外の専門家の協力を得て行なわれた極微希ガス質量分析計の立上げなど、新しい分野の展開や問題の解決には、研究者の間の協力が重要なことを心のどこかで実感していたのだろうと思う。兼岡さんは次々と難しいサンプルを持ってこられたが、それらを無事に測定できたことで、どの様なサンプルでもこなせる自信とノウハウができた。

こう書くと、あらゆることが順調で失敗の経験がないように聞えるかも知れない。確かに致命的な事故や失敗は間一髪のところまで回避できた。これには学部生の時に受けた講義が役立っていると思う。物理実験学という講義で、浅田常三郎先生(故人)は先生独特の漫談調の大阪弁で、戦前・戦中・終戦直後の理化学研究所や大学などで起こった様々な事故や失敗談を聞かせてくれた。化学薬品の怖さや強電(電池)の怖さなど、信じられないような話の数々だった。KCNを使ってテルル鉱物の化学分析をしていた時、ドラフトの中に頭を突っ込んでガスを吸い気を失いそうになって、青酸を使っていることが一瞬頭をよぎったために助かった。私は電気を触る時には左手はポケットに入れて右手で触ること、帰宅時には常に“ガス・水道・電気”と復唱しながら各部屋を見回ることを習慣にしていた。3000 Vのイオン加速電圧に触ってしまった時には、電流は右手の上腕から手の平に抜けたので、筋肉が引きつって10分間ほど右手が動かなくなっただけで助かった。またある日の夜、帰宅しようと質量

分析計の部屋のドアを開けると、床の上でスライダックが緑色の炎を出して燃えていた。緑色の炎は銅の炎色反応である。床のリノリウムが少し燃えただけで、火災報知器が鳴らなかったので内緒にして済ましたが、見回ることなく帰っていたら大変なことになっていただろう。この時の経験から、山形大学では廊下から実験室の内部が見えるように、実験室のドアの窓には透明ガラスを入れた。

3. 山形大学時代 (1979~1990年)

1979年、阪大で使っていた実験設備を携えて新設の山形大学理学部地球科学科に移った。学科新設の中心になった岩石学、新設の地殻進化学、物理地学、および応用地学の4講座12名のこぢんまりした組織だった。スタッフの出身大学も経歴も多様で、新たに赴任したメンバーの半分はアメリカからの着任だった。私にとって、習ったことのない地球物理学やその他の地学を相手の教育・研究だったので、戸惑いがなかったといえば嘘になる。また設備の面で困ったこともあった。質量分析計を2台もっていったが、1台は阪大でββ崩壊の研究に使っていたもの、他の1台は私の手製で、一緒に運んだ高周波誘導電気炉と組み合わせて、K-Ar及びAr-Ar年代測定専用の機にする予定だった。Ar-Ar年代測定では中性子照射した岩石鉱物からガスを抽出する。放射性物質を扱うために高周波誘導電気炉は放射線実験施設(RI)に入れたが、理学部の変電室の容量不足で配電してもらえなかった。転動して2年目に新しいビルに再度引っ越して、順調に仕事出来るようになったが、電気容量の不足は改善されなかった。それから暫くして、東北行政観察局(名称は正確でないかも知れない)というお役所の人が装置の使用状況の調査にやって来た。丁度よかったので、ちゃんと動いていた方の装置は実験ノートを見せて説明し、RIの高周波誘導電気炉は電源がないので動いていないと正直に話したところ、後日文部省から係官が調査に来た。電源容量が不足している旨を説明すると簡単に納得して帰って行った。そしてまもなく電源室の容量がアップされて、電気炉に電気が通じて使えるようになった。行政観察局の調査は最初で最後の経験だが、こんなボタンを押す手もあったのかと妙に納得した。

最初ちょっと戸惑ったこともあったが、山形での経験は私の地学に対する知識を豊かにし、楽しく有意義な10年半であった。学生のとき年代測定研究会で違

和感を感じた古生物学も、有孔虫の $\delta^{13}\text{C}$ や $\delta^{18}\text{O}$ による古環境の研究の話や、ナノ化石の美しい電顕写真とナノ化石による堆積層の非常に細かい年代決定の話聞いて興味湧いてきたし、火山ガスの研究(高岡, 1985)や若い火山岩の年代測定(高岡ほか, 1989)をとおして、岩石学の先生から火山学について勉強する機会を与えて頂いた。また他大学の多くの火山学や岩石学の先生方と知りあうことができた。ββ崩壊の研究では目立った成果はなかったが、地質調査所から赴任された応用地学の先生から、国内および外国のテール鉱物関係の資料を沢山頂くことが出来たのは有り難かった。今も大変役に立っている。

山形での経験の中で最も印象に残っているのは教育に関することである。学部にはいろいろなタイプの学生がいたが、時々、心の問題や経済的な問題で出席日数が不足し、成績の振るわない学生が8年目を迎える場合があった。規則では在籍期間が8年を過ぎると除籍になるので、何とか大学に来させて卒業させてやりたいと思うのは人情である。そんな学生の一人に、卒論で火山岩のK-Ar年代測定をしてもらうことにした。山を歩き回って試料の岩石を集めるのが気に入ったのか、それを分析して火山の年代を明らかにするのが気に入ったのか、1年も経たない内に彼は完全に立ち直って卒業し有名会社に就職した。もう一人の例は私が直接関わったものでなく後になって聞いた話であるが、私が九州に移った次の年、8年目になったのを心配した斎藤和男教授が、卒論をやらせるために学生を実験室に呼び出した。もともと電気回路やコンピューターに大変強かった彼は、実験室の質量分析計を見て大学には面白いものが一杯あると思ったらしい。分析計の電源の裏ぶたを開けて中を覗き、「先生、この電源の部品はみな2級品ですね」と云ったそうだ。確かにその電源は山形に移ってから科研費で作ったが、予算の制約で安く作ってもらったものだった。しかし部品が2級品かどうか私は知らなかった。この一件で実験室が気に入った彼は卒論を済ませ、課長直々の面接を受けて有名精密機器メーカーに入社した。その後、特別枠で勤務しながら大学院で学ぶ許可を会社から貰って大学院を修了し、今では幹部社員として忙しく働いているようだ。入学以来、彼が親の仕送りを全く受けずに、完全に自分の稼ぎだけで学費と生活費を工面していることを、私は彼から聞いて知っていた。しかしこのような能力を持っていることは全く予期しなかった。これを引き出したのは斎藤さんで

あるが、人の持つ能力の多様さと無限さを思わずにはおれない。年代測定や質量分析計がこんなふうに役立って大変嬉しかった。

4. 九州大学時代 (1990~2001年)

4.1 $\beta\beta$ 崩壊の研究

1990年10月、年度の途中で九州大学理学部へ転任した。4月に地球惑星科学科の学生募集が始まったばかりで、私の担当する講座はまだ設置されていなかった。次項で述べるように仕事の道具がなく、予算も潤沢でない状態だったので、私が受け持った地質学科の学生の修士論文をどうしようかと思案していた時、畏友 O. K. Manuel 氏 (ミズーリ大学; 黒田和夫先生 (故人) の弟子) から手紙を貰った。彼はいつもの調子で、“ワシントン大学 (セントルイス) の研究者が発表した ^{130}Te の $\beta\beta$ 崩壊半減期 $(2.7 \pm 0.1) \times 10^{21}$ 年 (Bernatowicz *et al.*, 1992) は正しくない”と沢山の理由を挙げて反論していた。九大の私の隣の研究室 (希元素地球科学講座) は、昔流に言えば資源地質学の講座で、以前から金鉱床の研究をしておられた。大谷金山のテルル鉱石をみてもらい、テルル鉱物について色々教えて頂いた。私は、ハンドピッキングでテルルピスマス鉱 (Bi_2Te_3) を分離し、テルルの定量を希元素地球科学講座の本村慶信さんをお願いした。本村さんは EPMA を用いて非常に丁寧にテルルの定量をしてくれた。この試料を岡山大 (三朝) 長尾研究室の改良型 VG5400 を使って分析した。また、鉱山の石英閃緑岩から分けた黒雲母とポーフィライト岩脈から分けたホルンブレンドを、山形大の斎藤研究室で K-Ar 年代測定してもらった。これ等の結果から得られた半減期は $(7.9 \pm 1.0) \times 10^{20}$ 年、ワシントン大学の人が発表した半減期の1/3だった (Takaoka *et al.*, 1996)。

2002年、Davos (スイス) で開催された Goldschmidt Conference で、ワシントン大学の研究者が、1992年に自分達の発表した半減期は正しくない可能性があることを報告した。私は勇気あるこの報告に対して、“これで長年の対立が解決する”と thanks をコメントした。最終的に彼等が論文でこれを認めたのは2008年である (Mesik *et al.*, 2008)。何故、彼等が急に考えを変えたのかは憶測の域を出ないが、一つは物理学者がイタリアとフランスの国境の地下1800 mで行っているカウンター実験 (NEMO-3) の結果が出始めたことであろう。NEMO は Neutrino Ettore Majo-

rana Observatory の略で、人間が中に入って作業できる巨大なカウンターを使って $\beta\beta$ 崩壊の半減期を測定し、特にニュートリノを放出しない $\beta\beta$ 崩壊半減期から、ニュートリノの質量を求める実験である。最新の結果 (Barabash, 2008) によれば、454 g の ^{130}Te を使って検出した109 events から求めた (ニュートリノを2個放出する $\beta\beta$ 崩壊の) 半減期は、 $(7.6 \pm 1.5_{\text{stat}} \pm 0.8_{\text{syst}}) \times 10^{20}$ 年であるが、NEMO のこの結果はまだ preliminary で、現在、彼等が推奨する ^{130}Te の半減期は $(9 \pm 1) \times 10^{20}$ 年である。この値は ^{130}Te よりも正確に半減期が物理的に測定されている ^{82}Se の半減期 $(9.6 \pm 0.3_{\text{stat}} \pm 1.0_{\text{syst}}) \times 10^{19}$ 年と、Kitkaite (NiTeSe) という鉱物から得た ^{130}Te の $\beta\beta$ 崩壊起源 $^{130}\text{Xe}_{\beta\beta}$ と ^{82}Se の $\beta\beta$ 崩壊起源 $^{82}\text{Kr}_{\beta\beta}$ の比、および Kitkaite の Se と Te の存在比から求めたものである。これまで Kitkaite の分析データは一つしかない (Lin *et al.*, 1986) ので、今後この珍しい鉱物の分析を行なって追試する必要がある。また、他の鉱物にも Se と Te 両方を含むものがあるので、そういう試料の測定も役に立つであろう。或いは NEMO-3 のデータが積み上げて、答えの出るの日もそう遠い先のことではないかも知れない。Te-Xe dating の実用化は目前であると確信する。実際、 ^{130}Te 半減期の不確かさはあるけれども、筆者らが行なった Cripple Creek 鉱山 (Colorado) 産の Au-Te 鉱物の Te-Xe 年代 (受賞講演; 論文準備中) は、金鉱物と一緒に産出する岩石を使って求めた Cripple Creek 鉱床の Ar-Ar 年代 (Kelley *et al.*, 1998) とよく一致している。

4.2 宇宙惑星物質研究室の立上げ

九州大学に移るに当たって、“部屋はないので大きなものは持ってきてくれるな”という条件付きだったので、希ガスの質量分析計は全部山形大に残すことにした。西日本の隕石 (宇宙惑星物質) 研究の核になる研究室を九州大学に作るのが私の夢だった。1993年に有馬温泉 (五社寮) で開催された同位体比部会で私はこのことを広言したが、夢の完成までに8年近い長い年月がかかるとは思いが及ばなかった。この点でも私は能天気であった。

まず経験したのは図書館の移管。山形にも九州にも隕石や月岩石の希ガス同位体の研究者はいなかったので、私は大阪から山形に移管した校費購入の図書館を九州に移管する積りだった。しかし、いざ引越す段になって、大阪から移管した図書館を九州大に移管できないという。特に NASA の月惑星シンポジウムのプロ

シーディングや隕石関係の初期の論文が載っている図書などは誰も使わないことが分かっていたが、規則がそうになっているというのである。これには困ったが、貸し出すということで決着して九大に運ぶことが出来た。最終的にこの問題が解決したのは、数年後、友人の教授が図書館長に就任した時、直訴して移管が完了し毎年々々手続きをし直す必要がなくなった。人事交流をもっと盛んにしなければいけないとよく言われているが、いろいろなところに障害があることを実感した。しかしこれは規則の問題で大したことではなかった。

最も困ったのは研究室のインフラ整備だった。“大きなものは持って来てくれるな”という条件付きだったので、希ガスの質量分析計は全部山形大に残して来たことは既に述べた。山形で有効に使ってもらえるように、火山岩石学の若手助手に第四紀火山岩の K-Ar 年代測定法を伝授した。そして九州大では2次イオン質量分析計を使って隕石物質に即した研究をしようと考えた。こう考えた理由の一つは、小沼直樹先生（故人）の一言だった。ぼたん雪が降った1982年のある日、新酒を買いに来たと言ってふらりと山形に来られた。隕石の話をしていた時、“高岡さん、自分でものを見なければだめですよ”と言われた。私もそれは気にしていたが山形では実現できなかった。1993年に正規に講座（地球惑星進化学講座）が新設されて助手のポストがついた時、いろいろ思案の末、鉱物出身の中村智樹さんを採用した。ぴったり適任の人が採用できたのだが、2次イオン質量分析計の予算をとるのは大変だった。結局転任から10年近くかかり、装置が納入されたのは停年退官の1年前（2000年3月）だった。

設備のあるなしに関わらず学生は毎年入ってくる。卒論や修論にまとめられるような仕事は九大だけでは出来そうにないので、岡山大学地球内部研究センターの長尾さんの希ガス質量分析計を共同利用させてもらった。100%おんぶに抱っこでは申し訳ないので私と一緒にいたり、中村さんに行ってもらうこともあったが、毎回々々では九州での本務にも差し支える。仕方がないので、2次イオン質量分析計が入手できるまでの繋ぎとして、希ガスマスを手に入れようと決めて科研費を申請し、1997年に希ガスマス（MM 5400）を買うことが出来た。この頃、大学は改組の真っ最中だった。私は学部長の補佐役のようなことをしていて、大学院重点化のまとめ、文部省に提出する

書類の作成、そして時々大学の本部と文部省へ説明などで大変だった。希ガスマスの立上げを長尾さんに手伝ってくれるようお願いし、快く助けてもらった。三朝の共同利用といい、今回の立上げといい、長尾さんの協力には深く感謝している。20世紀が終わる頃になって漸く重点化が終わり、1999年、予算要求が認められて2次イオン質量分析計が購入できることになった。納入されたのは停年の丁度1年前だったので、すべてを次の世代に任せ、私は装置には手を触れないことを心に決めた。中村さんは2次イオン質量分析計を操作して、電顕感覚で使えるといったので私は安心したが、しかしとにかくちゃんと測定出来る状態にして去るべきであると考えたので、東大地球物理学科の比屋根肇さんに立上げの手伝（ノウハウ伝授）をお願いした。彼等は私達より5,6年前に同じ装置を導入して既に多くの経験を積み、色々なノウハウを持っていた。快諾して下さった比屋根さんの親切には深く感謝している。これで私は安心して辞めることが出来た。

結局、夢が100%完成しないうちに停年が来てしまったのは残念ではあったが、理論・実験の両面で優秀なスタッフに恵まれて、西日本の宇宙惑星科学研究の中心場を九州に作る、という夢の基礎が一応創れたことに感謝している。私の退官後、若い人達はこれらの装置や共同利用施設などを利用して、隕石・宇宙塵・彗星塵（NASAの彗星探査機が捕獲した）の研究で立派な成果を出している（Yada *et al.*, 2004; Nakamura *et al.*, 2008）。2010年6月、小惑星探査機“はやぶさ”が無事に帰還を果たした場合、彼等は隕石だけでなく、宇宙塵と彗星塵の研究の経験を活かして“はやぶさ”のカプセル（サンプル容器）の蓋を開き、小惑星物質の先行研究を担うと聞いている。私は“はやぶさ”の無事帰還を心待ちにしている。

5. 終りに

九州大学に移った最後の10年で、地球外物質の研究に集中しようと考えた理由の一つは、阪大時代の若い頃から、月惑星シンポジウム（宇宙研）、太陽系起源の研究会（京大理）や宇宙物質の研究班などに参加させて頂き、機会に恵まれればこれに集中しようと考えていたからである。学生時代に現物を触ったこともなかったが、隕石は初期太陽系の情報を保存する宇宙物質である。1969年に南極で日本の観測隊が発見した南極隕石を太陽系起源の研究に活かすために、惑

星科学の多くの先生方が努力してこられた。私もその末席に座らせて頂き、かなりの長期間、国立極地研究所での隕石学と惑星科学の研究体制の確立に関わった。更に地球外物質の研究をしようと考えた別の理由は、正規に地球科学の教育を受けたことのない私にとって、地球史やその過程は複雑過ぎて手に余る代物と映ったからでもあった。

実際に本格的な宇宙物質の研究室を完成させるのは容易ではなく、当初に計画したインフラを揃えるのに10年もかかってしまった。だがスタッフには、林スクール（京大林忠四郎先生の研究室）出身の理論惑星物理学者と武田スクール（東大武田弘先生の研究室）出身の隕石鉱物学者を採用でき、最高レベルの人材を揃えることが出来たと考えている。また九州大学理学部地質学科にも素晴らしい技術があった。私は若い頃キューリー夫人の伝記を読んで、放射能の存在が知られていなかった時代に、ピエールとマリーはピエゾ電気を利用して放射性物質を定量的にトレースしたのを知って感銘を受けた。そのとき科学の研究も“丸腰では戦えない”と考えた。以来、インフラ整備は研究を進めるための3本柱の一つ（他の2つは、人的ネットワークの構築と現場の重視）と考えてきた。九大の鉱物学研究室ではガンドルフィーカメラを使って、微小結晶のX線解析を知って、これは宇宙物質の研究にとって大砲に匹敵する武器になると考えた。実際、強力な放射光X線と組み合わせることで、これはミクロンサイズの隕石鉱物、宇宙塵、彗星塵の結晶解析で威力を発揮した。同時に蛍光X線分析（非破壊元素分析）などと併用することによって、ミクロンサイズ宇宙物質の研究で極めて強力な武器になっている。

これまでのところを読めば、順風満帆全てが思う通りになったと誤解されよう。だが物事は決して全てがうまくいった訳ではない。予算を頂いたがうまくいかなかったこともある。一つはキセノンの共鳴吸収イオン化を利用した高感度質量分析計（RIMS）の開発、二つ目はイオン源の後に静電レンズを入れた高感度イオン源の作成である。共鳴イオン化には約250 nmの極短波長の紫外線を使う。これを実現するのは容易でない、何人かのレーザーの専門家を訪問して意見を聞いた。私はエキシマレーザーで紫外光を発振させることを考えていたが、エキシマレーザーを使っていた東北大化学の先生を訪問してご意見を伺ったところ、素人が使うにはエキシマは適さない、素人には

YAGのような固体レーザーがよいと言われた。1988年、世界で唯一キセノンのRIMSに成功しているシェフィールド大学（英）の友人を訪れて、話を聞き装置を見せてもらった。彼等の装置は強力なYAGで色素レーザーを励起し250 nm光を発振させるものだが、最終出力は2 mJ/10 nsもあった。1989年、YAGと色素レーザーの予算をつけて頂いたが、シェフィールド大のものと比べてYAGの出力は格段に低かった。また色素レーザーはフレームだけで色素の部分は予算不足のため別途手当てが必要だった。翌年九大に転勤することになったとき、これだけは引越越し荷物に入れた。しかし当てにしていた旧帝大も期待に反して金欠で、色素レーザーを手当てできない状態が続いた。反省の要点は、シェフィールド大学のようにレーザーに精通したスタッフ（または協力者）を得ること、その上で必要な性能（*e.g.*, 波長250 nm, パルス幅10 ns, ピーク値2 mJ）の装置を入手すること、そして安全の確保（特に開発段階では、十分な広さの専用部屋の確保）を図ること、これは絶対に必要である。

静電レンズ付の高感度イオン源の作成は、35年前（1975年頃）に阪大で長尾さんと試みて失敗した経験があった。再挑戦を試みたがまたもや敗退する羽目になった。主要な原因はイオン源がイオン光学に馴染まないため、調整には経験的な直感が不可欠なことだと思われる。学生では歯が立たなかった。会議の合間を見ての私の調整も通じなかった。じっくりと時間をかければもっと良い結果が得られたと思うが、部屋不足の状態が基本的に解決されていなかった、大型の希ガスマス（MM4500）の搬入を前にしてタイムリミットが来てしまった。自分の無能を棚に上げての言い訳になってしまったが、ここに述べた2つの課題は、果たせなかった夢として今も私の心の中に刺さったトゲである。この拙文を読んで、トゲを抜いてくれる人が現れることを期待する。

最後に、大阪大学・山形大学・九州大学では、学内および学外の多くの方々的好意と協力に支えられて研究・教育を進めることができた。この場を借りて厚くお礼申し上げて筆をおきたい。

文 献

- Barabash, A. S. (2008) NEMO-3 double beta decay experiment: Last results. In: Calorina International Symposium on Neutrino Physics, 15-17 May 2008; <http://www.physics.sc.edu/CINP/program.htm>. (Accessed in July, 2009)

- Bernatowicz, T., Brannon, J., Brazzle, R., Cowsik, R., Hohenberg, C. and F. Podosek, F. (1992) Neutrino mass limits from a precise determination of $\beta\beta$ -decay rates of ^{128}Te and ^{130}Te . *Physical Review Letters*, **69**, 2341–2344.
- Goepfert-Mayer, M. (1935) Double beta-disintegration. *Physical Review*, **48**, 512–516.
- Hintenberger, H., Weber, H. and Takaoka, N. (1971) Concentrations and isotopic abundances of the rare gases in lunar matter. *Proceedings of Second Lunar Science Conference*, **2**, 1607–1625.
- Kaneoka, I., Takaoka, N. and Aoki, K. (1977) Rare gases in a phlogopite nodule and a phlogopite-bearing peridotite in South African kimberlites. *Earth and Planetary Science Letters*, **36**, 181–186.
- Kelley, D. K., Romberger, S. B., Beaty, D. W., Pontius, J. A., Snee, L. W., Stein, H. J. and Thompson, T. B. (1998) Geochemical and geochronological constraints on the genesis of Au-Te deposits at Cripple Creek, Colorado. *Economic Geology*, **93**, 981–1012.
- Lin, W. J., Manuel, O. K. and Oliver, L. L. (1986) Double beta-decay of ^{82}Se and ^{130}Te . *Nuclear Physics*, **A457**, 285–291.
- Mesik, A. P., Hohenberg, C. M., Pravdivtseva, O. V., Bernatowicz, T. J. and Kapusta, Y. S. (2008) ^{130}Te and ^{128}Te double beta decay half-lives. *Nuclear Physics*, **A809**, 275–289.
- Nagao, K., Takaoka, N., Matsuo, S., Mizutani, Y. and Matsubayashi, O. (1980) Change in rare gas composition of the fumarolic gases from Showa-shinzan volcano. *Geochemical Journal*, **14**, 139–143.
- Nagao, K., Takaoka, N. and Matsubayashi, O. (1981a) Isotopic anomalies of rare gases in the Nigorikawa geothermal area, Hokkaido, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **44**, 82–90.
- Nagao, K., Takaoka, N. and Matsubayashi, O. (1981b) Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **53**, 175–188.
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tsutiyama, A., Ushikubo, T., Kita, N. T., Valley, J. W., Zolensky, M. E., Kazuya, Y., Sakamoto, K., Mashio, E., Uesugi, K. and Nakano, T. (2008) Chondrulelike objects in short-period comet 81P/Wild 2. *Science*, **321**, 1664–1667.
- Ogata, K., Okano, J. and Takaoka, N. (1964) Preliminary report on the half-life of ^{130}Te double beta-decay. *Advances in Mass Spectrometry*, **3**, 603–614.
- Takaoka, N. and Ogata, K. (1966) The Half-life of ^{130}Te double beta-decay. *Zeitschrift für Naturforschung*, **21a**, 84–90.
- 高岡宣雄 (1970) 蒸留法によるモリブデン鉱物からの微量ルテニウムの化学分離と表面電離法によるルテニウムの同位体分析. I 予備実験. 質量分析, **18**, 888–893.
- Takaoka, N. (1972) An interpretation of general anomalies of xenon and isotopic composition of primitive xenon. *Mass Spectrometry* (質量分析), **20**, 287–302.
- Takaoka, N. (1976) A low-blank, metal system for rare gas analysis. *Mass Spectrometry* (質量分析), **24**, 73–86.
- Takaoka, N. and Nagao, K. (1978) Rare gas studies of Yamato -7301 (j), -7304 (m) and -7305 (k). *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue*, **No. 8** (Proceedings of the Second Symposium on Yamato Meteorites), 198–208.
- Takaoka, N. and Ozima, M. (1978) Rare gas isotopic composition in diamonds. *Nature*, **271**, 45–46.
- 高岡宣雄 (1985) 希ガス同位体による火山ガスの研究—噴火予知を目指して—. 火山 第2集, **30**, 185–195.
- 高岡宣雄, 今野幸一, 大場与志男, 今田正 (1989) 蔵王火山溶岩の K-Ar 年代測定. 地質学雑誌, **95**, 157–170.
- Takaoka, N., Motomura, Y. and Nagao, K. (1996) Half-life of ^{130}Te double- β decay measured with geologically qualified samples. *Physical Review*, **C53**, 1557–1561.
- Wakita, H., Fujii, N., Matsuo, S., Notsu, K., Nagao, N. and Takaoka, N. (1978) “Helium spots”: Caused by a diapiric magma from the upper mantle. *Science*, **200**, 430–432.
- Yada, T., Nakamura, T., Takaoka, N., Noguchi, T., Terada, K., Yano, H., Nakazawa, T. and Kojima, H. (2004) The global accretion rate of extraterrestrial materials in the last glacial period estimated from the abundance of micrometeorites in Antarctic glacier ice. *Earth Planets Space*, **56**, 67–79.