



Photo Kiranori Kirano

## Index

気象予測研究の最前線……………	三好 建正	1
日本における <sup>99</sup> Mo製造の現状と課題 …河村 弘・棚瀬 正和・山林 尚道・太田 朗生・竹内 宣博		6
〔コラム〕 2nd Column ……………	中川 恵一	11
〔新刊紹介〕 「がんの時代」……………		12
公益財団法人原子力安全技術センターからのお知らせ……………		12
ISO TC85 SC2（放射線防護）国際会議について ………	中村 尚司	13
図説 量子ビーム・放射線利用 —第3回 原子核の崩壊をおさらいする— ……………	岡田 漱平	15
〔サービス部門からのお願い〕 ごユーザーの変更連絡はお早めに……………		19



## 気象予測研究の最前線



三好 建正\*



激しい気象が増えてきたように感じる。2018年も、7月豪雨で200人以上もの尊い命が奪われ、その後の猛暑、台風上陸と、激しい気象による災害が続いた。ゲリラ豪雨という言葉が飛び交い、ゲリラ豪雨の頻度が増えてきたとも言われる。ほかに、日々生活し、活動していて、気象に影響を受けることはたくさんある。事前に予測して、それに対応した行動をとることが効果的である。

気象予測の精度は確実に向上してきた。未来予測は人間の本能であり渴望だが、気象予測は、現代科学によって未来を予測する成功例である。気象予測を行うために、世界各地で同時に観測を行い、これらを瞬時に交換できるようにした。この歴史は古く、遠隔通信手段としてテレグラムが発明されると利用し、無線通信が可能となれば利用した。各地の同時刻の観測データを地図上にプロットすることで、等圧線や等温線を解析し、場所毎の風の流れを見比べて、低気圧や前線が西から東へ移動しながら雨をもたらすことなどが明らかとなった。これにより気象学が飛躍的に進展し、低気圧や前線の動きを予測することで、気象予測ができるようになった。

また、1946年に完成した黎明期の電子計算機ENIACを使って行った最初の計算の一つが気象のシミュレーションである。1955年には米国気象局はコンピュータIBM701を導入

し、シミュレーションによる気象予測（数値天気予報）を実用化した。気象庁も1959年に日本政府が行政用として初めて導入したコンピュータIBM704を使い、数値天気予報を開始した。当時数値天気予報はまだ新しく、日本は実は数値天気予報の先進国である。2019年は日本の数値天気予報の開始からちょうど60年になる。その間、数年毎にコンピュータを更新し、そのたびに桁違いに高性能化してきた。現在の気象庁のスーパーコンピュータは、2018年に更新されたところである。

さらに、レーダーや人工衛星といった先進的な計測技術を導入し、気象予測を改善してきた。数値天気予報に使われる人工衛星観測は1979年頃から行われており、それからちょうど40年になる。その間、静止軌道や極軌道、低軌道などに様々なセンサを搭載した人工衛星が打ち上げられ、数値天気予報に活かされてきた。数値天気予報の根幹を成すのが、観測データとシミュレーションを結ぶ「データ同化」と呼ばれる方法である。データ同化の精度が数値天気予報の精度を左右するため、特にここ30年ほどの間、気象学におけるデータ同化の研究が急速に発展してきた。今やデータ同化は気象学の一大分野となっている。なお、筆者の専門分野は気象学だが、特にデータ同化を専門としており、現在理化学研究所計算科学研究センターでデータ同化研究チー

\* Takemasa MIYOSHI 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター データ同化研究チーム チームリーダー

ムを主宰している。

このように、気象予測は、情報通信技術、スーパーコンピューティング技術、衛星を含む高度な計測技術という現代科学の粋を集めることで、その予測精度を着実に向上してきた。しかしこれで十分だろうか—否、もし十分であったならば、最近の災害でももっと被害を防げたに違いない。土砂崩れや洪水などで命が奪われる被害は、事前に予測し安全な場所へ避難すれば、もっと防げるはずだ。今の気象予測は、避難に十分に結びついていないのではないか。ではどうすれば避難できる気象予測ができるのか。

避難をする人の気持ちになってみる。「〇〇県南部に大雨特別警報が発令されました。身を守る行動をすぐにとってください。」という情報を耳にして、すぐに避難という行動をとる人がどれだけいるだろうか。あるいは、「〇〇さん、裏の崖が3時間以内に崩れる恐れが高まっています。今すぐに避難してください。」という情報ではどうだろうか。それでも100%避難するかは分からない。しかし、後者の方が「自分事」として捉え、避難に結びつくように思う。その違いは、情報の精細さ、つまり「ピンポイントさ」である。まず、誰に対するメッセージなのか。一人の人を行動させるとき、メッセージの対象が大勢のうちの一者であるより、唯一その人だけである方が強く働く。次に、場所とタイミングである。「〇〇県南部」という広い範囲のどこか、という指定では、まさか〇〇県南部全体が全滅ということはないわけだから、自分は大丈夫ではないか、と思う余地を残す。「裏の崖」であれば、ほかのどこでもなく自分に影響する。疑いの余地はない。

このように、避難に直結する気象予測には、今よりも桁違いな「ピンポイントさ」が必要となる。そのためにはどうすれば良いのか。

そもそもピンポイントな予測ができないの

は、予測が不確実だからだ。予測には必ず不確実性が伴う。例えば台風の進路予測は、予報円という形で幅を持って発表されている。「ピンポイントさ」を向上するには、まず予測の精度を向上し、そもそも不確実性を減らすことが重要である。つまり、予測をもっと当たるようにする。また同時に、予測が不確実であることを前提にして、その不確実性を正確に捉え、活用することも重要である。つまり、起こりうる将来シナリオを確率的に捉え、今とるべき行動を最適化する。命が奪われるような災害リスクがあるならば、その最悪のシナリオを避けるよう行動する。

まず、予測をもっと当たるようにする気象予測研究の最前線を紹介する。筆者が率いる研究グループで取り組んでいるスーパーコンピュータ「京」と気象衛星ひまわり8号による観測データを活かした研究である。

台風や集中豪雨の予測を向上するため、気象衛星ひまわり8号による10分毎の観測データを活かした研究を行った。もちろん今の気象庁の数値天気予報でも、ひまわり8号のデータは活かされている。ここでは、今は使われていない雲域の赤外線観測データを活かす研究を紹介する<sup>1</sup>。

ひまわり8号は、赤道上の静止軌道に位置しており、赤外線や可視光の合計16の波長帯(バンド)の放射の強さを10分毎に観測する。従来のひまわり7号は、30分毎の観測だった。それと比べ、ひまわり8号は約50倍のデータを観測する桁違いに優れたセンサを持つ。気象庁の数値天気予報では、晴天域の赤外線観測データと、雲の動きを追跡して解析した風のデータを使っている。雲域の赤外線観測データは、直接は使われていない。

これには理由がある。一つには、雲の正確なシミュレーションは非常に難しいことが

<sup>1</sup> 2018年1月18日理化学研究所プレスリリース  
([http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180118\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180118_1/))

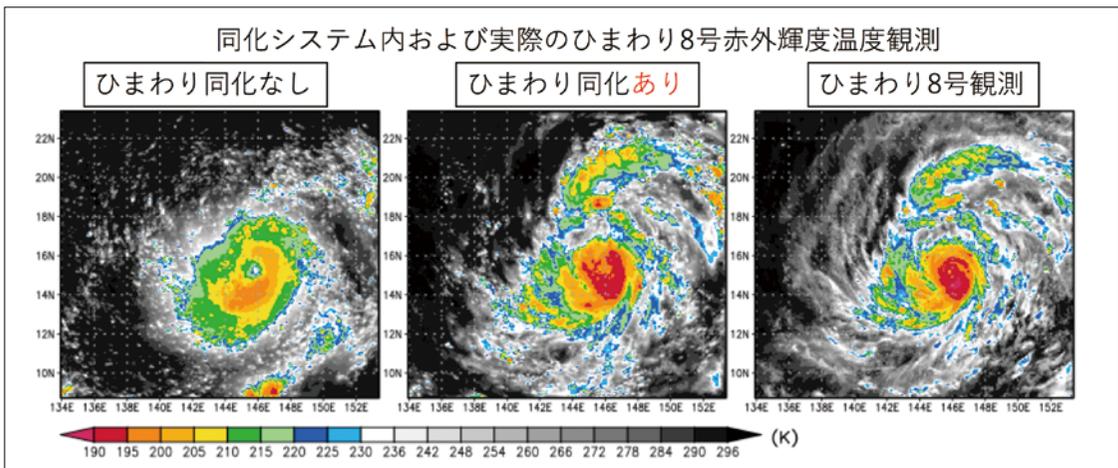
ある。観測データをシミュレーションに活かすには、お互いを比較して、その差を刻一刻とリアルタイムに埋めていく必要がある。シミュレーションが正確である場合、ある時刻で埋めた差は、ある程度維持されたまま次の時刻へと移る。しかし、シミュレーションが不正確な場合、ある時刻の観測データを使って差を埋めたとしても、不正確なシミュレーションによって次の時刻ではまた大きな差が生まれてしまう。このため、せっかく観測データで差を埋めても、すぐに差が開き、予測改善にはあまり結びつかない。場合によっては、シミュレーションにとっては異質な観測データによって、シミュレーションが乱されて、予測が悪化することもある。雲域の赤外線観測データには、このような難しい問題がある。

別の理由として、赤外線は主に雲の頂上を観測するが、同じ雲の頂上を実現する雲がたくさんあり得るとい問題がある。雲の頂上は観測できても、その下が見えないからだ。晴天域は地球表面まで見えるので、このような問題はない。ほかに、雲がある場合とない場合で大きく異なる観測値となるため、晴天域と雲域の境界近くで扱いが難しいなどの

問題がある。

このように、雲域の赤外線観測データを数値天気予報に活かすのは難しいが、考えてみると、テレビや新聞の天気予報などでひまわり8号の画像を見て注目するのは、雲である。ひまわり8号の雲画像から、台風がここにあるとか、前線が延びているとかを見つけて、天気予報に役立てている。それなのに、数値天気予報では雲域は活かせないというのは残念ではないか。我々が目で見て情報として捉える雲の部分に限ってわざわざ取り除いて捨てるのだから。

そこで、ひまわり8号の雲域の赤外線観測データを活かすための研究に取り組んだ。初めは、台風の構造が壊れるなどの問題が起こってうまくいかなかったが、スーパーコンピュータ「京」の規模を活かし、様々な試行錯誤を同時並行で大量に計算することで、ひまわり8号をうまく活かすためのデータ同化手法を開発した。その結果、2015年で一番強かった台風第13号は、**図1**に示すようにひまわり8号の観測データをうまく取り込んでシミュレーションすることに成功した。これにより、**図2**に示すように、台風の強度の予測



**図1**

2015年8月2日22時(日本時間)における台風第13号のシミュレーション。左はひまわり8号データ同化なし、中央はひまわり8号データ同化あり、右は実際のみまわり8号観測を示す。ひまわり8号赤外輝度観測のデータ同化によって、実際に観測された台風の詳細な構造を再現できたことが分かる。2018年1月18日理化学研究所プレスリリースの**図1**を転載。

が大幅に改善した。台風の強度の予測は気象学における難問の一つとして知られている。スーパーコンピューティング技術は着実に向上し、観測技術も大幅に向上して、気象学も発展してきたというのに、台風強度予測につ

いては過去30年間全く予測精度が改善していない。最近の研究で、台風中心付近の雲に関する詳細の観測データを活かすことが台風強度予測の改善に役立つようだ、ということが分かってきた。ここで紹介した成果もそれと整合的である。今後、他の台風事例で評価検証が必要だが、台風強度予測という難問に対し、一筋の光を見た気がしている。

豪雨予測という観点では、2015年9月に鬼怒川が決壊して大災害となった関東・東北豪雨の予測に取り組んだ。図3に示すように、ひまわり8号を同化しないシミュレーションでは、12時間後に起こる豪雨は予測されたものの、場所が実際より100km以上西にずれて予測された。これでは鬼怒川が決壊は予測できない。一方、ひまわり8号の赤外線観測データを活かすことで、実際と同様の場所に豪雨が予測されるようになり、鬼怒川の流量予測にも大幅な改善をもたらした。

以上で示したのは、予測精度を向上し、不確実性を減らすための気象予測研究の最前線である。このように、予測精度改善のため努力が続いている。

これと同時に、予測には不確実性が含まれ

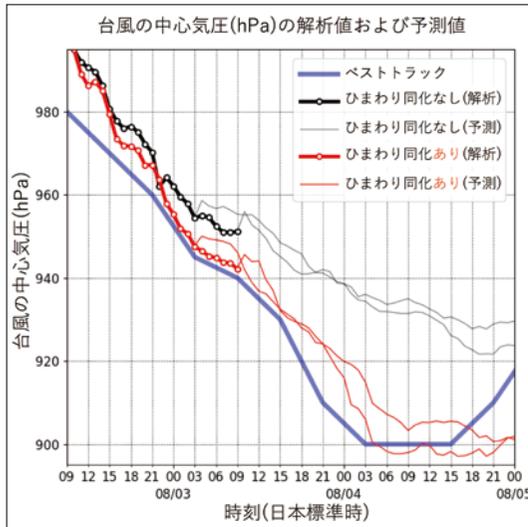


図2

2015年8月のシミュレーションによる台風第13号の中心気圧の解析値、予測値、及び気象庁による推定値(ベストトラック)。気象庁による推定値(ベストトラック・青太線)と、ひまわり8号同化なし(黒線)、ひまわり同化あり(赤線)の解析値(太線)及び予測値(細線)を示す。ひまわり8号赤外線観測のデータ同化によって、台風の急発達予測が大幅に改善されたことが分かる。2018年1月18日理化学研究所プレスリリースの図2を転載。

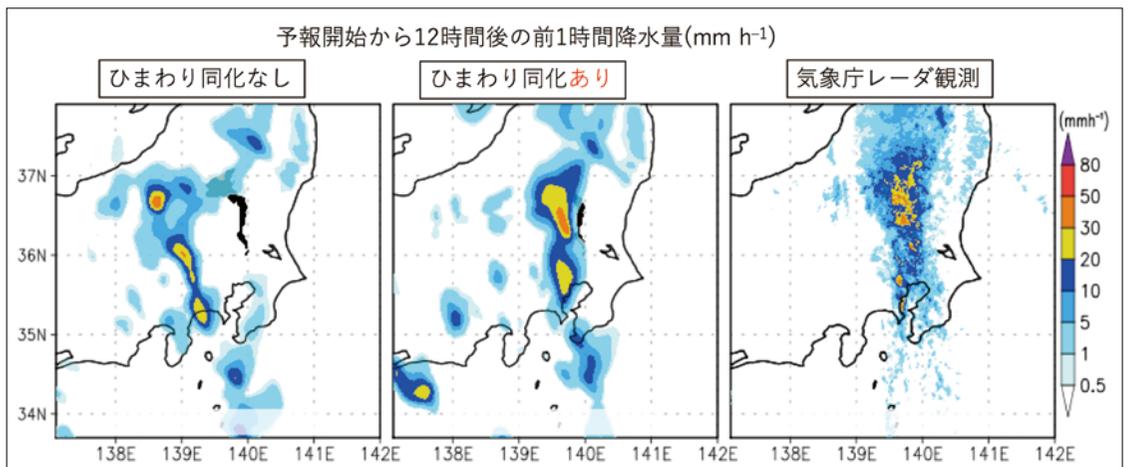


図3

2015年9月9日午前9時を初期時刻とする12時間降水予報の結果と実際のレーダ観測。左はひまわり8号同化なし、中央はひまわり8号同化ありの降水予報、右は気象庁によるレーダ観測から推定された降水量。ひまわり8号観測を同化することで、南北に伸びる降水帯の位置が大幅に改善されたことが分かる。いずれも、理研の数値天気予報モデル、データ同化システムを用いた計算。2018年1月18日理化学研究所プレスリリースの図3を転載。

る前提で、不確実性を正確に捉え、起こりうる将来シナリオを確率的に捉えた上で、最適な意思決定を行うことも重要である。不確実性を捉えるため、複数のシナリオを予測する「アンサンブル予報」が行われている。気象庁では全球アンサンブル予報を行っているほか、今後新たに局地的な現象も表現できるメソアンサンブル予報の開発も進められている。また、アンサンブル予報の確率情報をより正確にするためのデータ同化手法についても研究が進んでいる。これらの確率情報を活用するための検討も進んでいるが、今後さらに活用の可能性を探る必要がある。

本稿の最初で述べたように、事前に予測して、それに対応した行動をとることは重要である。気象が今後どうなるのか、複数のシナリオを予測する。それに対して行動をとれば、その行動によって未来は変化する。その変化シナリオも捉えることで、よりよい未来を選んで行く。

こう述べると簡単なことのように思えてくるが、確率情報に基づいて行動を決めることは、実際は非常に難しい。カジノで賭け事をするを思えば、その難しさが分かる。高倍率の賭けが当たるという最善のシナリオから、すべて外れるという最悪のシナリオまで、様々なシナリオがある確率で起こりうる中で、意思決定をしなければならない。確率情報を元に算出した統計的な期待値で判断すれば、宝くじは買わないし、競馬もしないだろう。しかし、期待値が低くとも、少ない確率でもリスクをとって高倍率の賭けに出ることもある。

確率情報ということは、要するにどうなるかは分からず、リスク情報として捉えることを意味する。リスクをとることもできるし、リスクを最小限にすることもできる。災害においては、命のリスクは非常に大きい。少しでも命のリスクがあるなら、命を失うという

最悪のシナリオを避ける行動をとるべきだ。すべての人々がそのように考えれば、正しい確率予測が与えられたとき、命が奪われることはなくなる。

気象予測に関して、確率に基づく意思決定で典型的なのは、降水確率だろう。降水確率を見て、傘を持っていかどうか等を決めることもあるだろう。降水確率は、毎日のように広く報道されるため、ユーザーが見慣れてきて、個々の経験に基づいてどう使うか判断されている。しかし、災害の場合、過去に経験がない時に特に甚大となる。災害のようにめったに起こらないことに対して、確率情報をどう解釈して判断するのか、難しい問題である。

科学者は、予測の精度を改善する努力と、予測の確率情報をより正確にする（予測の不確実性を正確に捉える）努力を行っている。これらは、科学で行う将来予測の2大要素であり、いずれもまだ改善の余地がある。その上で、不確実な予測情報を社会にどう活かすのか。その社会システムを考えることが、特に災害においては重要な問題で、今後も検討を重ねていく必要がある。激しい気象について、科学の力で確率予測を行い、命が奪われることはない。そのような強靱な社会を築きたいと思う。

#### 著者プロフィール

2000年京都大学理学部卒業、気象庁入庁。2003年より2年間、人事院行政官長期在外研究員としてメリーランド大学に留学、2005年メリーランド大学より気象学博士号取得。気象庁予報部数値予報課技術専門官、メリーランド大学助教授を経て、2013年より現職。現在、理化学研究所数値創造プログラム副プログラムディレクター、理化学研究所開拓研究本部主任研究員、メリーランド大学客員教授、京都大学連携教授、海洋研究開発機構招聘上席研究員などを兼任。2014年度地球惑星科学振興西田賞、2016年日本気象学会賞、2018年読売テクノフォーラムゴールドメダル賞など多数受賞。主な研究分野は、スーパーコンピュータを使った天気予報。シミュレーションと現実世界を結ぶ「データ同化」の第一人者として、スーパーコンピュータの膨大な計算と、世界中の気象観測データを結びつけ、天気予報の革新に挑む。

# 日本における<sup>99</sup>Mo製造の現状と課題

河村 弘\*1、棚瀬 正和\*2、山林 尚道\*3、太田 朗生\*4、竹内 宣博\*5

## 1. はじめに

核医学診断は全世界で年間3,000万件以上行われており、そのうちの80%が<sup>99m</sup>Tc（テクネチウム-99m、半減期6時間）を使用した検査である。世界の人口の高齢化に伴い、特に途上国における需要はますます増加する傾向にある。<sup>99m</sup>Tcの安定供給確保のためには、「<sup>99m</sup>Tcの親核種である<sup>99</sup>Mo（モリブデン-99、半減期66時間）を製造する研究用原子炉の老朽化の問題にどのように取り組むか」、「核兵器転用可能な高濃縮ウラン（HEU）を原料と

する製造法から如何に脱却するか」等が、重要な課題となっている。そのため、製造プロセスにおける低濃縮ウラン（LEU）ターゲットへの移行、<sup>99</sup>Moを用いた放射化法による製造、加速器の利用等、HEUに依拠しない技術体系の確立が急がれている。

<sup>99</sup>Mo（<sup>99m</sup>Tc）は100%輸入されているが、同様に、産業・生活等に不可欠な石油に対して、約50年前に起こったオイルショックにより、日本経済は大きな損害を受けた。それ以降、国民のエネルギーセキュリティを守るため、日本政府は、1975年に「石油備蓄法」を制定し、

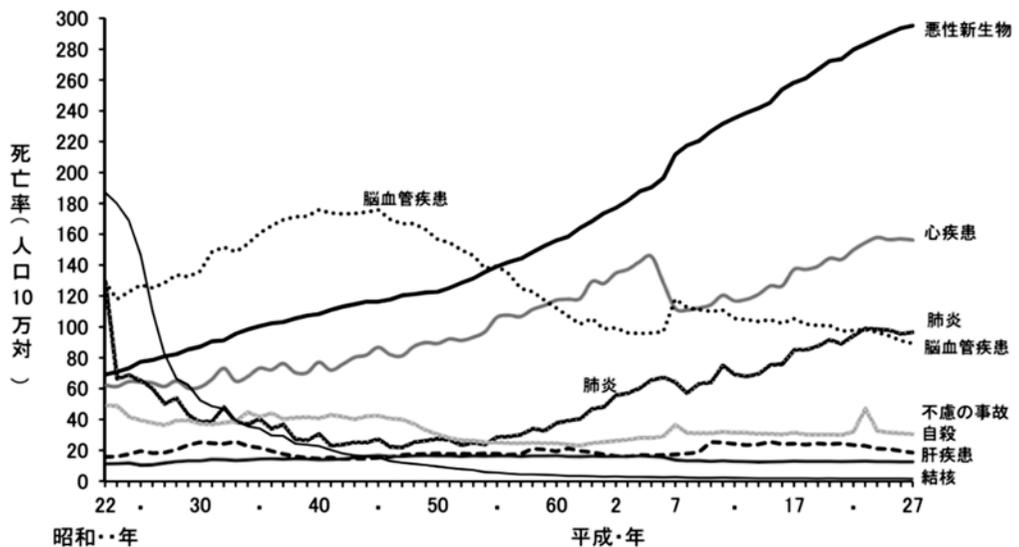


図1 国民の死亡原因の経時変化

\*1 Hiroshi KAWAMURA 営業統括本部 特別参与  
 \*2 Masakazu TANASE 大洗研究所 アドバイザー  
 \*3 Hisamichi YAMABAYASHI 大洗研究所 アドバイザー  
 \*4 Akio OHTA 大洗研究所 研究開発課  
 \*5 Nobuhiro TAKEUCHI 顧問

民間備蓄を法的に義務付け、「90日備蓄増強計画」をスタートさせ、1978年には、国家備蓄を開始し、現在まで継続されている。

一方、<sup>99</sup>Moは、国民の生命に係る健康管理のために不可欠な放射性同位元素であり、石油と同じように輸入できなくなり、がんの手術等に欠かせない放射線診断ができなくなった事象が最近発生した。1件は2009年のカナダ原子力公社のNRU原子炉が運用停止に至り、製造ができなくなった事象であり、もう1件は、2010年にはアイルランドの火山爆発により、欧州からの飛行機が飛ばず、<sup>99</sup>Moが国内へ輸入できなくなった事象である。昨今、地球の気候変動が異常な状態になってきており、このようなことが起こらないと言い切れる人はいないと思われる。そのため、日本国民の安全・安心を守るためのセキュリティの視点から、<sup>99</sup>Moの国産化は必要不可欠になってきており、内閣府が主催した<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcの安定供給のための官民検討会で2011年に「我が国のテクネチウム製剤の安定供給に向けてのアクションプラン」がまとめられ、今日までそれに基づいて日本アイソトープ協会を中心にして各種検討が進められてきた。

また、厚生労働省でまとめられた日本における死亡原因の推移を図1に示す。1980年頃に死亡原因のトップが、「心疾患（心臓病）」から「悪性新生物（がん）」に代わり、現在は死亡原因の約30%は「がん」になってきている。このがんの診断に欠かすことができないものが、<sup>99</sup>Moであり、その用途はアルツハイマー病等の診断へも広がってきている。

## 2. <sup>99</sup>Moの需要と供給に係る現状

世界の<sup>99</sup>Mo需要量としてはOECD/NEAの医療用RI供給確保専門家グループ（HLG-

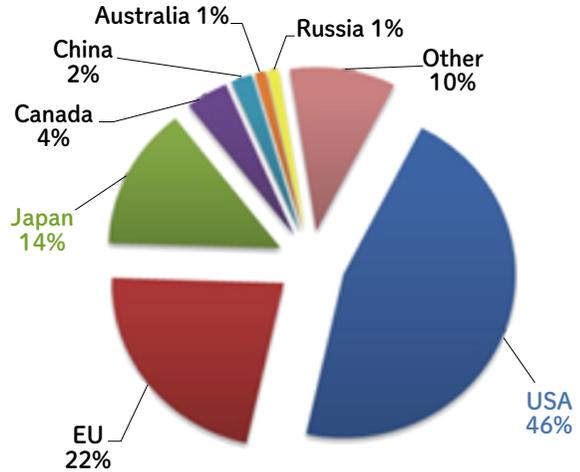


図2 世界における<sup>99</sup>Moの需要

MR)が、市場関係者から得た情報を基に、それまでの値よりも低い9,400 6 day-Ci/週に修正した（6 day-Ciとは、分離・精製施設を出荷してから6日後の放射能量を示す単位であり、一般に原子炉照射後8日後の値）。この需要の減少は2009-2010年の供給危機を経験して、医療現場における<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcの節約、<sup>99m</sup>Tc製剤供給増加策、<sup>99m</sup>Tcジェネレータの溶離効率の向上、診断スケジュールの調整、ガンマカメラの感度向上等の結果と思われる。現在は、毎週約9,400 6 day-Ciの<sup>99</sup>Moが、図2のように各地域に供給され、消費されている。なお、日本と米国は、<sup>99</sup>Moを全く製造せず、世界の供給量の約60%を消費している国である。

自国の消費分のいくらかは、自国で生産しなければ、世界的責任が全うできないだけでなく、放射性診断（がん病巣の同定等）ができなくなり、がんで死ななくてもいい国民を死なせるような状況に陥る可能性がある。

日本アイソトープ協会発行「アイソトープ等流通統計 2018」による放射性医薬品<sup>99m</sup>Tc製剤および、<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tcジェネレータの供給推移を図3に示す。国内供給量は2017年度で<sup>99m</sup>Tc製剤300 TBq、<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tcジェネレータ

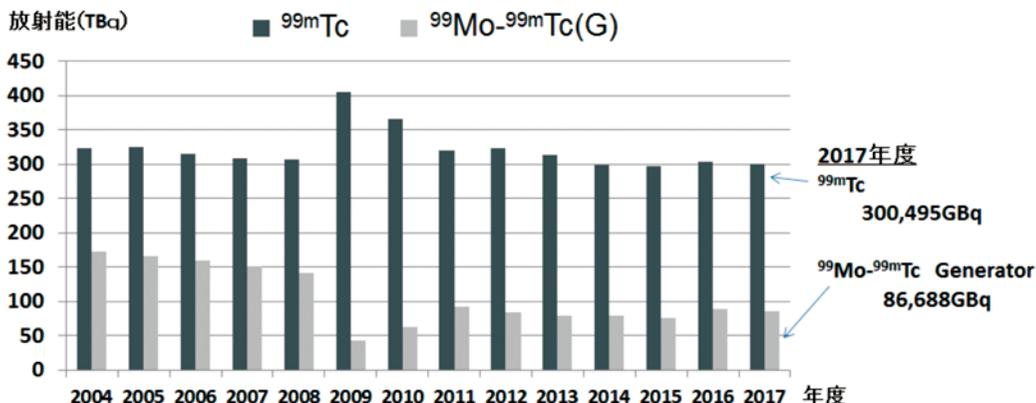


図3 99mTc製剤および、99Mo-99mTcジェネレータの供給推移

86.6 TBqである。2009年カナダNRU炉稼働停止、2010年オランダHFR炉の稼働停止による影響で99Mo供給危機を迎えたが、その後の輸送トラブルも製薬会社・医療関係者の努力でほぼ安定した供給確保を維持してきた。しかしながら、2018年6月以降原料供給元の製造トラブルにより99mTc製品の供給制限が11月中旬まで続いた。核医学検査では、PET検査が増加し、99mTc SPECT検査は多少減少の傾向にある。原子炉或は加速器の利用を問わず、99Mo製品の一部でも国内製造されることを切

に願うところである。

### 3. 99Mo製造を行っている研究用原子炉の現状

世界で99Mo製造を長年にわたって行ってきた研究用原子炉及び新規参入した研究用原子炉を各々表1及び表2に示す。

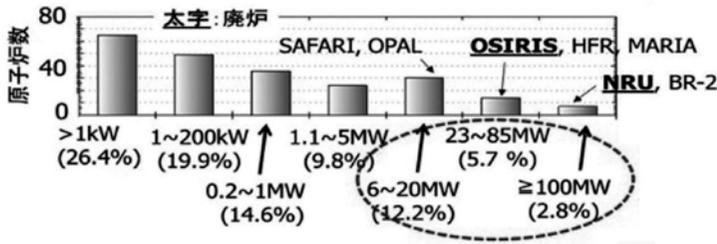
表1、2及び図4でも明らかなように、既に2基が運転停止しており、今後10年程度でOPAL炉を除くすべての研究用原子炉は稼働終了予定である。国内においても唯一の99Mo

表1 長期稼働中の99Mo製造用原子炉

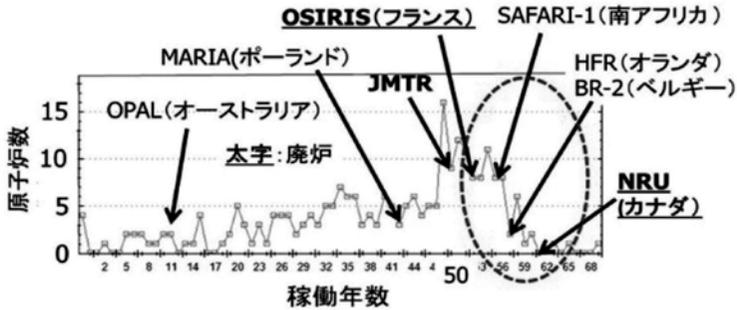
原子炉	ターゲット	照射 (6 day-Ci/週)	初臨界年月	運転終了年
NRU (カナダ)	HEU	4,680	1957年11月	2018 (終了)
HFR (オランダ)	HEU	4,680	1961年11月	2024
BR-2 (ベルギー)	HEU	7,800	1961年6月	2026
Osiris (フランス)	HEU	2,400	1966年9月	2015 (終了)
SAFARI-1 (南アフリカ)	LEU	3,000	1965年3月	2030

表2 新規参入した99Mo製造用原子炉

原子炉	ターゲット	照射 (6 day-Ci/週)	初臨界年月	運転終了年
LVR-15 (チェコ共和国)	HEU	2,800	1957年9月	2028
MARIA (ポーランド)	HEU	2,200	1974年12月	2030
OPAL (オーストラリア)	LEU	3,500	2006年8月	2055



(a) 熱出力による分類



(b) 稼働年数による分類

図4 世界の研究用原子炉の現状

の製造可能な研究用原子炉JMTRは予算確保が困難という理由で廃止措置計画に記載されている。

国内に研究用原子炉を新設するとしても、国のライセンスや設計・建設等のために少なくとも10年は必要となる。<sup>99</sup>Mo製造は国民の安全・安心のために必要不可能なものであり、国が持つべき機能であることを念頭に置き、JMTRを新規制基準に適合させるための改修を行い、新たに研究用原子炉が日本に建設されるまでの期間限定で再稼働し、<sup>99</sup>Moの供給リスクを回避することも考慮すべきである。

#### 4. 米国における<sup>99</sup>Moの国産化計画

最近の資料(2018年8月)によると世界の<sup>99</sup>Moの需要量は9,400 6 day-Ci/週である。米国では、現在、自国での商業的な製造は行われておらず、需要量の半分弱、4,300 6 day-

Ci/週程度を輸入していると考えられる。

そのため、同国では、エネルギー省(DOE)の国家核安全保障局(NNSA)の主導で2007年より国産<sup>99</sup>Mo製造ルートを開拓するため、幾つかのプロジェクトに対して1件あたり2,500万ドルを上限として50%経費負担方式による資金援助を行っている。また、開発にあたっては、核不拡散の観点からターゲットとして低濃縮の<sup>235</sup>U(ウラン-235)を使う方法や、<sup>235</sup>Uを使わない方法での製造を提唱している。そして、早い時期での市場への参入を目指した開発が行われている。

その中で、同国では、既存の方法とは異なる、原子炉や加速器による幾つかの代替法が検討されている。その内の有力なプロジェクトは、NorthStar(NorthStar Medical Radioisotopes LLC)社とSHINE(SHINE Medical Technologies, Inc.)社によるものであり、両社の開発状況を紹介する。

### (1) NorthStar社の開発計画

同社では2つのプロジェクトを同時に進めている。1つは、短期的なもので、ミズーリ大学の研究用原子炉（MURR）でターゲットに $^{235}\text{U}$ ではなく、安定同位体の $^{98}\text{Mo}$ を使う $^{98}\text{Mo}$  ( $n, \gamma$ )  $^{99}\text{Mo}$ 反応により $^{99}\text{Mo}$ を生成させる方法である。この方法により、米国の需要の2/3程度の3,000 6 day-Ci/週を製造する計画である。他の一つは、長期的な観点から進めるもので、電子加速器で光子を発生させ、 $^{100}\text{Mo}$  ( $\gamma, n$ )  $^{99}\text{Mo}$ の核反応により $^{99}\text{Mo}$ を得るものである。両プロジェクトは2020年からフル生産に入る。

### (2) SHINE社の開発計画

SHINE社は、D（重水素）とT（トリチウム）のd-t反応で得られる中性子を液体のターゲットである低濃縮の $^{235}\text{U}$ を含む $\text{H}_2\text{SO}_4$  (aq)（硫酸）に照射し、 $^{99}\text{Mo}$ を製造しようとしている。この方法で、米国の需要の大半に近い、3,800 6 day-Ci/週をカバーする計画である。2020年に製造を始め、2022年にはフル生産に入る。

### (3) 最近の開発状況

現在、日本と同じような状況にある（即ち、自国での $^{99}\text{Mo}$ の商業的な製造が行われていない）米国におけるNorthStar社とSHINE社でのプロジェクトについて述べた。これらのプロジェクトは、2018年初頭の時点で次のような状況になっている。NorthStar社の原子炉による $^{99}\text{Mo}$ の製造技術開発は、MURRでの照射設備の整備を終え、安定同位体の濃縮 $^{98}\text{Mo}$ を使ったスケールアップを図る段階に入っている。また、同社の加速器による製造では、加速器の選定を終え、スケールアップ計画を進めている。一方、SHINE社では、製造設備の建設の許可が下りたところである。両社とも、計画は遅れている様子であるが、ごく最近（2018年10月）、

連邦政府からの資金援助が承認された、とのニュースがあった。

## 5. まとめ

- 
- (1)  $^{99}\text{Mo}$ は、放射線診断において必要不可欠な放射性同位元素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の親核種である。その供給は100%輸入であり、海外に国民の安全・安心をゆだねている。
  - (2)  $^{99}\text{Mo}$ 供給は、稼動以降50年を過ぎた研究用原子炉で供給量の90%を担っており、今後、長期的な安定供給体制維持が困難な状況にある。
  - (3) 世界的に見て、 $^{99}\text{Mo}$ を製造せず、消費しているだけの国は、米国と日本であり、その消費量は世界全体の各々46%及び14%である。
  - (4) 世界的製造状況を踏まえ、米国は2020年頃を目処に国産化計画を進めている。
  - (5) 日本は、2011年に原子力委員会で国産化検討体制を整え、産学官一体で研究開発を進めてきたが、東日本大震災後に定められた新規制基準に基づく研究用原子炉JMTRの改修費用が確保できず、廃止されようとしている。国が持つべき機能として国産化計画を遂行するため、速やかに改修予算を確保し、JMTRを再稼働すべきである。
  - (6) All Japanで国が持つべき機能を担っている研究用原子炉のあり方も含めて $^{99}\text{Mo}$ の国産化検討を至急行う必要がある。

## 謝 辞

---

源河次雄氏に原稿作成のための各種データを提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

日本は、男性の3人に2人、女性の2人に1人近くが、がん罹患する「世界一のがん大国」です。欧米では減少に転じているがん死亡数も、増え続けています。たとえば、今、わが国で最も多いがんは大腸がんですが、このがんの死亡者数は、日本が米国を上回っています。受動喫煙対策の遅れ、がん検診受診率の低さ、手術偏重で放射線治療の件数が少ないなど、がん対策の遅れが多く目立っています。その背景には、国民のがんに関する知識、理解の不足があると思います。

しかし、今、全国の小中高校で、保健体育を中心に、道徳や総合学習などの時間も使った「がん教育」が始まっています。

2008年11月8日、東京・国立市の中学校で全校生徒を対象にがんの授業を行いました。私にとって、初めてのがん教育の授業でした。10年後、がん教育がこれほど脚光を浴びるとはその時、思ってもみませんでした。

がん対策推進協議会は、がん対策基本法が定める政府諮問会議で、私は協議会の発足以来、10年間にわたって委員を務めました。2009年2月の協議会で「子どもたちへのがん教育が大事。国立市で実際に行った」とがん教育の重要性を指摘したのが議論のきっかけとなり、第2期の「がん対策推進基本計画」にがん教育が盛り込まれました。

2016年のがん対策基本法が改正され、がん教育が条文に書き込まれ、さらに第3期の基本計画では、がん対策を支える基盤としてがん教育が位置づけられています。中学と高校の学習指導要領にもがん教育が追加されてい

ます。10年前には想像もできませんでした。これから、日本でも欧米と同様、がん死亡数も減少に転じると思います。

一方、わが国は原子力爆弾の世界で唯一の被爆国でありながら、放射線に関する理解は遅れていました。実際、放射線に関する教育については、1980年までは中学校の理科での授業がなされていましたが、2008年3月に中学校理科の新学習指導要領が告示されるまでの約30年間、中学校、高校ではほとんど教えられてきませんでした。しかし、「放射線教育が30年ぶりに復活」と言われた2008年の学習指導要領の中では、2012年度から中学3年生を対象に、「エネルギー資源」の項目の中で「放射線の性質と利用」にも触れることが定められました。そして、放射線教育の再開へ向けた準備期間中だった2011年3月に、福島第一原子力発電所事故が発生し、放射線教育の欠如と必要性が再認識されることになったわけです。

しかし、学校現場では長らく教えられることがなかったため、教員には、放射線に関する知識や授業経験の不足が目立ち、放射線教育支援のための有効な教材などが求められてきました。映像などを用いたより分かりやすいツールを求める声が多数あり、こうした要望を受けて、「Rの正体～放射線の性質と利用～」を制作し、文部科学省選定も受けました。

#### 【問い合わせ】

放送映画製作所内 理科教材事務局係

電話：03-5202-6087

メール：info@hosoeiga.co.jp

新刊紹介



「がんの時代」

著者 中川 恵一  
 発行 株式会社海竜社 (TEL: 03-3542-9671)  
 定価 1,200円+税  
 2018年10月発行

2019年1月号よりコラム連載をさせていただいております東京大学医学部附属病院放射線科准教授の中川恵一先生の新刊です。

これまで中川恵一先生が「日本経済新聞」等に連載してきたコラム等々を大幅に再編集し、書き下ろしを加えたものです。

内容は、なぜ日本は「がん大国」かのお話から、がんは今やコントロールできる病気であり、がんになった場合、放射線治療を受ける他、選択肢が多くある等々、がんに関して分かり易くまとめた1冊です。

日本の男性のうち3人に2人、女性は半数が罹患するといわれています。

一度、手にとってみては如何でしょうか。

(高橋 英典)

目次

はじめに

第1章 「がん大国」日本

第2章 がんで死ぬ

第3章 がんの壁—中川恵一／養老孟司 対談

第4章 がんと生きる

第5章 がんと向き合う社会へ

おわりに

公益財団法人原子力安全技術センターからのお知らせ

★平成30年度講習会について★ (平成30年12月6日現在)

※最新の情報についてはHPをご覧ください。

URL: <http://www.nustec.or.jp/>

講習名/月	2月	3月
登録定期講習	2: 東京 (医療) 4: 東京 21: 広島 22: 福岡	1: 東京 6: 大阪
医療機関の放射線業務従事者のための放射線障害防止法講習会	16: 大阪 (予定)	2: 東京 (予定)

★出版物について★

放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル (2015)、放射線施設の遮蔽計算実務 (放射線) データ集 (2015) 等発売しております。

上記の詳細・お申込み: 講習出版グループ メールアドレス: [kosyu@nustec.or.jp](mailto:kosyu@nustec.or.jp) 電話: 03-3814-5746

講習名/月	2月	3月
第1種放射線取扱主任者講習	京都25-3/1	京都11-15
第2種放射線取扱主任者講習	東京20-22 京都13-15	大阪25-27
第3種放射線取扱主任者講習	東京7-8 大阪7-8 青森14-15	大阪7-8

上記講習の詳細・お申込み

東京開催 : 本部研修センター メールアドレス: [kcenter@nustec.or.jp](mailto:kcenter@nustec.or.jp) 電話: 03-3814-7100

京都・大阪開催: 西日本研修センター メールアドレス: [w-center@nustec.or.jp](mailto:w-center@nustec.or.jp) 電話: 06-6147-3580

青森開催 : 青森研修センター メールアドレス: [a-center@nustec.or.jp](mailto:a-center@nustec.or.jp) 電話: 0175-71-1185

# ISO TC85 SC2(放射線防護)国際会議について

ISO/TC85/SC2国内審議委員会委員長 中村 尚司

ISO/TC85/SC2は、国際標準化機構（ISO）に属する核エネルギー、原子力技術の平和的利用分野の専門委員会TC85傘下の分科委員会の一つで、電離放射線からの個人及び環境の防護分野に関する規格を取り扱っています。この委員会には、さらに具体的なテーマ毎に、11の作業グループ（WG）が組織され、具体的な規格の審議を行っています。ISO/TC85/SC2の国内審議団体である（公社）日本保安用品協会に国内審議委員会を設置し、WGに対応する専門家26名（2018年9月現在）によって、活発な標準化に関する討議を行っています。例えば、近年では、我が国から提案した、トロン測定法、シンチレーションスペクトロメータを用いたγ核種の迅速スクリーニング法が出版されている他、現在でも光子線治療における蛍光ガラス線量計を用いた線量評価法、現存、計画及び緊急被ばく状況における環境モニタリングの包括的ガイドライン、低線量γ線標準場、放射能標準体積線源、ラドン校正施設におけるQA/QCなどの新規規格について、我が国の委員が提案し、議論を主導しております。

これまで、この会議は年に1回、加盟各国持ち回りで開催されており、我が国では2000年に東京で開催しています。近年の国内委員の活躍や福島第一原子力発電所の事故による知見を踏まえた国際標準化分野におけるさらなる我が国の貢献への期待も有り、2019年の日本招致が決定されました。

福島第一原子力発電所の事故以降、我が国では原子力発電は社会的に厳しい環境にある一方で、新規基準の下で安全性を高め、ベースロード電源としての役割を果たしてゆくことが期待されています。海外においても中国や

インドなどアジア圏を中心に、積極的に原子力開発を進めています。また、原子力の利用はエネルギー利用だけでなく、放射線利用の分野と車の両輪の関係にあることは、いまさら言うまでもありません。特に、放射線は医療など生活に密着している部分でも使われており、これらを安全に管理するには、放射線防護は必要不可欠な技術であります。防護の基本は、正確な測定です。放射線測定機器類は、近年のエレクトロニクス技術の著しい進歩により、高度化が進められております。さらに、測定結果の整合性やデータの互換性には、測定値の基礎となる標準とそのトレーサビリティの重要性が認識されつつあり、放射線・放射能標準とそのトレーサビリティ、測定方法の標準化は、安全利用推進において極めて重要であります。このようなトレーサビリティ確立のための機器の校正方法はISO規格による規定を元に日本工業規格（JIS）化されております。また、多くの放射線測定機器の製品規格が国際電気標準会議（IEC）規格として出版されておりますが、放射線性能試験に規定された標準場はISO規格に定めるものであり、ISOは測定機器製品にも密接に関わりがあります。

ISO/TC85/SC2とその関連WGは、これらの放射線防護に係わる計測法や計測器具に関する標準規格を議論し、制定する重要な委員会です。この様な会議を我が国に招致することは、我が国の関係者の活動を支援するだけでなく、広く原子力や放射線利用に関係する企業と技術者に、標準の重要性を啓発してゆく良い機会です。ISO/TC85/SC2では、数多くの文書が回付されており、これらについて、私共国内委員会では、要回答案件には100%の対

## ISO TC85 SC2に設置されたWG一覧

ISO/TC85/SC2/AG1	Advisory Group (顧問グループ)
ISO/TC85/SC2/WG2	Reference radiations fields (参照放射線場)
ISO/TC85/SC2/WG11	Sealed sources (密封線源)
ISO/TC85/SC2/WG13	Monitoring and dosimetry for internal exposure (内部被ばくモニタリングと線量評価)
ISO/TC85/SC2/WG14	Air control and monitoring (空調モニタリング)
ISO/TC85/SC2/WG17	Radioactivity measurements (放射能測定)
ISO/TC85/SC2/WG18	Biological dosimetry (生物学的線量評価)
ISO/TC85/SC2/WG19	Individual monitoring of external radiation (外部放射線の個人モニタリング)
ISO/TC85/SC2/WG21	Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft (民間航空機内での宇宙放射線被ばくの線量評価)
ISO/TC85/SC2/WG22	Dosimetry and related protocols in medical applications of ionizing radiation (電離放射線の医療応用における線量評価とプロトコル)
ISO/TC85/SC2/WG23	Shielding and confinement systems for protection against ionizing radiation (電離放射線防護のための遮蔽及び封じ込めシステム)
ISO/TC85/SC2/WG25	Radiation monitoring of the population and responders in nuclear/ radiological emergencies (核・放射線非常時における住民および対応者の放射線モニタリング)

応を行っております。

標準化は、自ら開発した技術を普及させるために重要であることはもちろんとして、一度方向が決まると、関連する他の規格もそれを参照し、追随する性格を持つことから、初期段階の議論が極めて重要であります。規格の原案文書に接し、コメントすることが出来るのも、ISOにおける国際標準化活動に参加する重要なポイントと言えます。福島第一原子力発電所事故以降は、特に我が国において多くの知見が得られ、それらを積極的に取り入れて、我が国の標準規格を世界に広める端緒になるこ

とが期待されます。原子力や放射線利用に係わる、多くの関係機関・関係各位のご支援を賜り、2019年のISO/TC85/SC2国際会議開催を成功させることを要望いたします。

## 2019年国際会議開催予定

- 【日 程】** 2019年5月21日(火)～24日(金)  
**【会 場】** 岡山理科大学  
**【住 所】** 〒700-0005  
 岡山県岡山市北区理大町1-1

# 図説 量子ビーム・放射線利用

## －第3回 原子核の崩壊をおさらいする－

大洗研究所 特別研究員 岡田 漱平

### 1. はじめに

まずお詫びと訂正です。前回（第2回）の中性子ドーピング法による半導体製造の説明で、ベータ崩壊のファインマン図形に問題がありました。あまり難しい問題に立ち入らないようにしようとしたため、科学的に正しくない説明をしてしまいました。

そこで今回は、これを訂正するとともに、千代田テクノルの社員がなんらかの形で日常的に関与している原子核崩壊の過程の背景にある物理現象（文中に下線を引いてあります）を、やや掘り下げておさらいすることにしました。

### 2. ふたたび中性子ドーピング法による半導体製造について

製造プロセスの途中のベータ崩壊の過程を

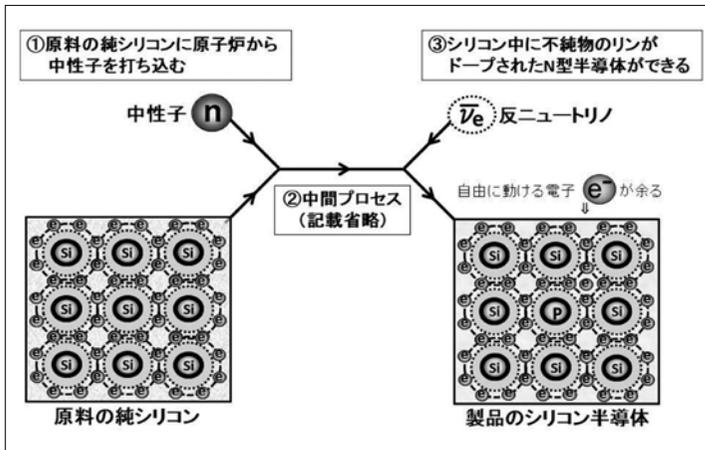
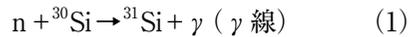


図1 中性子ドーピング法による半導体製造プロセスの全体像をファインマン図形で表したもの

正しく扱って訂正した中性子ドーピングの全体像を図1に示す。このプロセスは<sup>30</sup>Siへの中性子 (n) 照射による<sup>31</sup>Si生成反応：



と、<sup>31</sup>Siが<sup>31</sup>Pに変化するベータ崩壊：



によって起こる。 $\bar{\nu}_e$ は反ニュートリノで、これが問題をややこしくしている。

このプロセスで最終的に残るのは、シリコン中にドーブされたリン(P)と $e^-$ と $\bar{\nu}_e$ である。この $e^-$ はどこに行ったのかというと、図1を見ていただくとわかるように、シリコン中に1個余分に足されて電気伝導を担う電子に化けているのである。

では、上の(2)式のベータ崩壊を正しくファインマン図形で表すとどうなるのか。以下に他の崩壊過程も含めて見て行くことにする。

### 3. ベータ崩壊はどのようにして起こるのか

原子核の崩壊過程の説明に入る前に、ファインマン図形のルールについておさらいしておこう。図2に示す通り、ファインマン図形というのは、素粒子(A、B、A'、B'などで表す)の反応、たとえば、



を図で表して、この反応過程の起こりやすさ（反応確率、散乱断面積などとも言う）を計算す

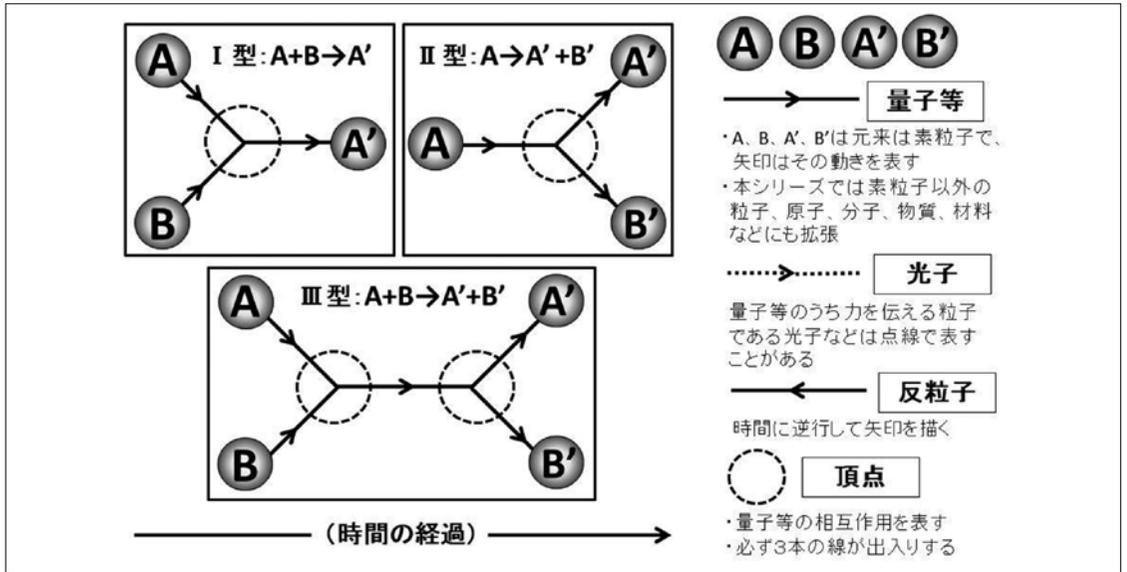


図2 ファインマン図形のルール

るために考案されたものである。描き方にはいろいろな流儀があって、時間の経過に関しても縦に（下から上へ）描いたり、あるいは右から左に描いたりする場合もある。本シリーズでは、A、Bなどを素粒子以外の粒子、原子、分子、物質、材料などにも拡張して、量子ビームが関与するいろいろな反応（物質創製プロセス、微細構造観察など）の説明に利用するため、(3)のような反応式の表式と視覚的に一致するよう、左から右へ時間が経過するような描き方をすることにして

図2に示す通り、反ニュートリノや陽電子などの反粒子は時間に逆行して矢印を描くことになっている。図1の反ニュートリノの矢印が逆向きなのはこのためである。これは実際の粒子の動きとは逆であるが、反応確率の計算を行う時の都合上このようにしている。また矢印の交点は「頂点」と呼びならわされているが、必ず3本の線が出入りするよう

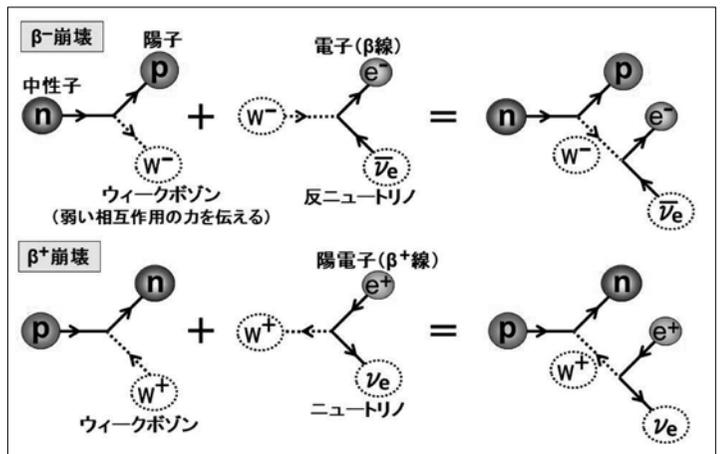


図3 β<sup>-</sup>崩壊及びβ<sup>+</sup>崩壊のファインマン図形

合上そうになっているのである。

ところで、ベータ崩壊は(2)の反応式で表される。困ったことに、これを図に描くとnの1本線がp、e<sup>-</sup>、ν<sub>e</sub><sup>-</sup>の3本線に分かれるので、それらの線の交点は4本の線が出入りすることになりファインマン図形のルールには合わない。背後に何かあるのでは？

そう、それが1983年にCERN（欧州合同原子核研究所）で確認されたW粒子（ウィークボゾン）なのである。この粒子は自然界を支配する4つの相互作用（力）のうちのひとつ

である「弱い相互作用(弱い力)」を媒介する粒子である。W粒子にはマイナスの電荷を持った $W^-$ と、その反粒子である $W^+$ とがある。

図3の上図に示すように、 $\beta^-$ 崩壊では中性子が陽子に変わるとともに、超短寿命の $W^-$ を経由して電子と反ニュートリノが放出されるのである。これと同様に考えると、 $\beta^+$ 崩壊は、陽子が中性子に変わるとともに、 $W^+$ を経由して陽電子とニュートリノを放出する反応と考えてよいだろう。

#### 4. 電子捕獲はどのようにして起こるのか

原子は、原子核の周りを電子が軌道を描いて周回している模型で表される。電子捕獲は、この電子(核外軌道電子)のうち内側(原子核に近い方)にある電子が原子核に取り込まれることによって起こる。図4にその様子を図示する。

前述したように、 $\beta^-$ 崩壊を図4①のように描くと、これはファインマン図形とは言えない。しかし、電子捕獲の反応を素直に絵にすると②のようになり、いかにもファインマン図形のように見える。しかし、ニュートリノが関与する反応は弱い相互作用によって起こっているはずなので、厳密にはウィークボゾン $W^+$ を経由する③のように描くのが正しいのではないかと思う。

#### 5. ガンマ崩壊はどのようにして起こるのか

ガンマ崩壊を単純化したファインマン図形

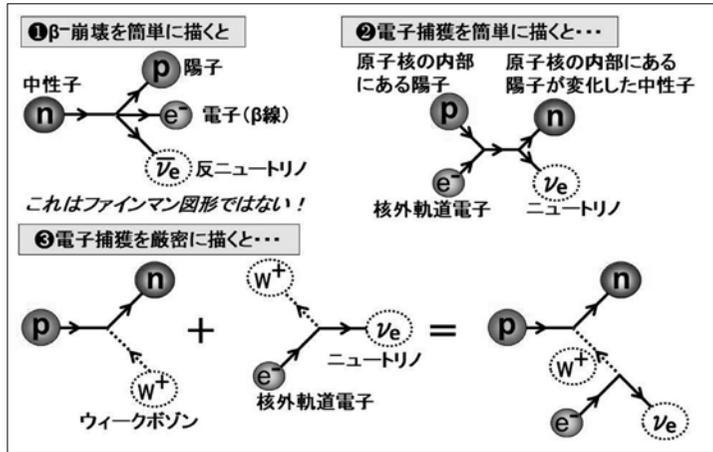


図4 電子捕獲のファインマン図形③とファインマン図形もどき①②

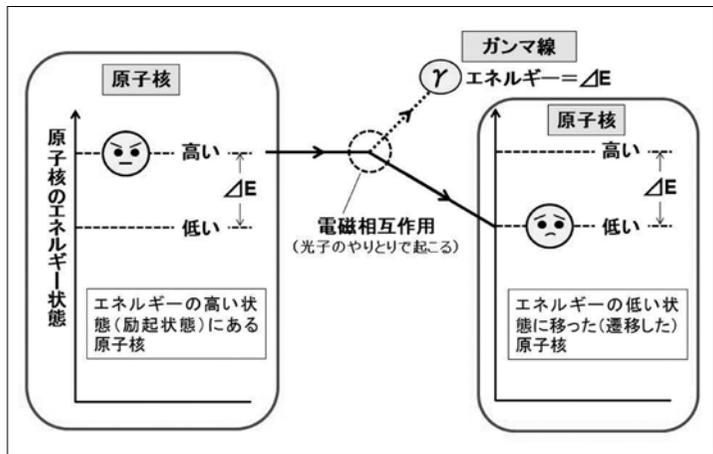


図5 ガンマ崩壊のファインマン図形

を図5に示す。原子核にはとびとびのエネルギー値を持った複数のエネルギー状態が存在する。ガンマ崩壊は、エネルギーの高い状態(励起状態)にある原子核がエネルギーの低い状態に変化することによって起こる。

この変化は、自然界を支配する4つの相互作用(力)のうち「電磁相互作用(電磁気力:電荷の間に働く場合はクーロン力)」によるものである。この相互作用は光子を媒介して伝えられる。そのため、反応前後のエネルギー差は光子の形で放出される。これがガンマ線である。

## 6. アルファ崩壊はどのようにして起こるのか

図6に示す通り、アルファ崩壊は質量 $M_i$  (静止しているものとして運動量はゼロ)の重い原子核が、質量 $m$ の $\alpha$ 粒子(ヘリウム原子核; 運動量は $mv$ )と、元の原子核より中性子数と陽子数がともに2個ずつ少ない質量 $M_f$  (運動量は $\alpha$ 粒子と反対方向に $-M_fV$ )の原子核に核分裂する反応である。

反応前の原子核の静止エネルギーは、アインシュタインの特殊相対性理論から $M_i c^2$  ( $c$ は光速)、反応後の静止エネルギーは同様に $(M_f+m)c^2$ である。反応の前後でエネルギーは保存されるので、

$$Q = M_i c^2 - (M_f+m)c^2 \quad (4)$$

がプラスであれば、この分のエネルギーが反応によって解放され、反応後の2つの粒子の運動エネルギーになる。

反応の前後で運動量も保存されるので、

$$0 = mv - M_f V \quad (5)$$

である。(4)と(5)式から、 $\alpha$ 粒子の運動エネルギー $E_\alpha$ は、

$$E_\alpha = (1/2)mv^2 = Q / (1 + m/M_f) \quad (6)$$

となる。 $Q < 0$ であればこの反応は起こらない。

ところで、 $\alpha$ 粒子が最初の原子核から飛び

出すには図6に示すようなポテンシャルの壁を越えなければならない。このポテンシャルは、①のクーロンポテンシャル(陽子の間に働く電磁相互作用)と②の核子(陽子と中性子)間に働く強い相互作用(強い力、核力)によるポテンシャルの和である。この壁は $Q$ よりも高いので、いくら $Q > 0$ であっても普通は越えることができない。しかし、 $\alpha$ 粒子は量子力学が適用される小さな粒子であるため、トンネル効果によって忍者のように壁をすり抜けることができるのである。アルファ崩壊はこのようにして起こる。

## 7. 千代田テクノルの社員は日々現代物理学の神髄に触れている

いま、あなたは放射線測定器を高く持ち上げて、お客様に放射線の説明をしているとする。このときあなたは、自然界を支配する4つの相互作用(力)のうち強い相互作用(強い力)、弱い相互作用(弱い力)、電磁相互作用(電磁気力)の3つ、そして特殊相対性理論と量子力学を背景に説明しているのだ。また、反ニュートリノや陽電子などの反粒子の存在は、量子力学と特殊相対性理論を合体した相対論的量子力学でないと説明できない。

ところで、測定器を持っていて腕が疲れませんか? そう、測定器と地球の間には自然界を支配する4つ目の重力相互作用(重力)が働いている。これで4つの相互作用が全部出そろったわけだ。かくしてあなたは、日々現代物理学の神髄に触れているのである。

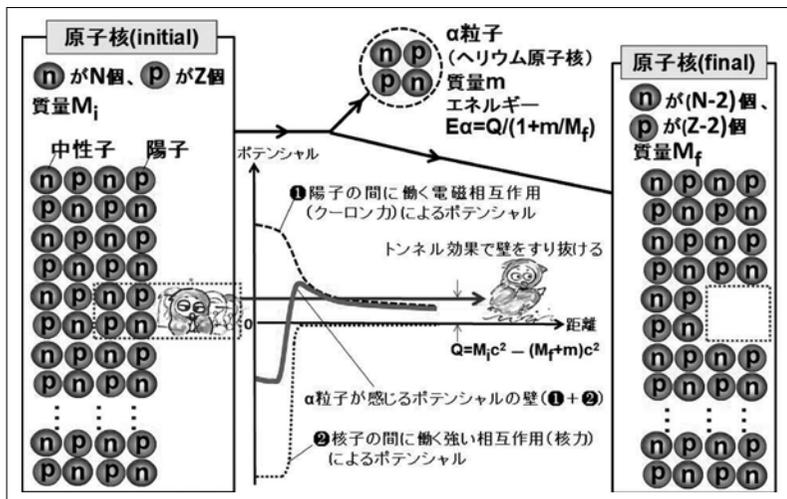


図6 アルファ崩壊のファインマン図形

サービス部門からのお願い

## ご使用者の変更連絡はお早めに

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして誠にありがとうございます。  
 年度替わりは、他の時期に比べて、ガラスバッジご使用者の変更手続きを多く受付けております。そのため、手続き完了までにお時間をいただく場合がございます。

ガラスバッジご使用者に変更がございましたら、お早めにご連絡くださいますようお願い申し上げます。

なお、ガラスバッジご使用者の変更は、「ガラスバッジWebサービス」からお手続きが可能です。「ガラスバッジWebサービス」の入力操作に関するお問合せは、弊社 線量計測事業本部 TEL 03-3816-5210までお願いいたします。

**\*「ご使用者変更連絡票」はこちらまで…**

**測定センター フリーダイヤルFAX：0120-506-984**

## 編集後記

- 本欄執筆の当番が回ってきた筆者は今年の年男である。「改元前の静けさ」の中で新年を迎えたが、天・地・人の何れの界においても“ザワツキ”の度合いを増しているのが気になっている。天象・地象・人象が複合的に絡み合う“想定外”の“大異変”に襲われるのではないかと心配になるのは安全管理に長年関わってきたサガのなせるワザである。
- 異常気象の規模と頻度が激増している感があり、衛星とスーパーコンのお蔭で精密化の進んでいる気象予報について世の関心が高まっていることもあり、理化学研究所の三好建正先生に解説をお願いした。
- 医薬用Mo-99mの安定的国内調達計画が進行している。これまで海外依存で医療基盤のsecurity対策上懸案とされてきた課題克服のためである。弊社営業統括本部特別参与の河村弘編集委員を中心に解説をお願いした。
- 放射線防護の目標に“被曝による発癌確率の上昇ゼロ”を掲げることが多いが、現実を目を向けると、日本では、男性の場合3人に2人、女性の場合は2人に1人の割合で癌を抱えている。先号から始まった、東大病院の中川恵一先生のコラム12回シリーズは、がんと放射線についての“合理的な見方・考え方”を教えるためのものである。
- 弊社大洗研究所の岡田アドバイザーが昨年からお目元向けに行っている連続講演が好評と聞き、『図説 量子ビーム・放射線利用』とのタイトルで連載をお願いしている。
- リチャード・P・ファインマン (1918-1988) といえ、1986年の宇宙船シャトル爆発事故の原因が真空パッキングの低温劣化による機能喪失だったことを解明したり、1950年代に起きたオークリッジでの臨界事故の原因が排水路の曲がり角での意図せぬウラン屑の蓄積であったことを突き止めた人物として有名であるが、本職は理論物理学で、量子電磁力学の発展への寄与を称えられて1965年に朝永振一郎、J.シュヴィンガーと並んでノーベル物理学賞を受けている。
- 素粒子間の反応を記述する方程式の書下ろしの便を考えて、そのR.P.ファインマンが考え出した図があり、ファインマン・ダイアグラム (FDと略記) と呼ばれている。時間軸を縦 (下方過去、上方未来) にとり、空間軸を1次元にして横に取り、粒子を実線、反応媒介ボソンを波線で表すのだが、伝統的な放射線物理の教科書では、 $\gamma$ 線と物質の相互作用として、並列に扱われる光電効果・コンプトン散乱・電子対生成は、対応するFDをアインシュタインの宇宙原理を以て眺めると (神の御身になって眺めるとのこと) 3者は全て同じものであることを知る。岡田アドバイザーは、このFD (の手法?) を活用して講演を行っているとのことなので、筆者もその手腕と成果に、大いなる関心を寄せているところである。(加藤 和明)

## FBNews No.506

発行日/平成31年2月1日

発行人/山口和彦

編集委員/今井盟 新田浩 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 河村弘  
 谷口和史 岩井淳 片桐和真 小口靖弘 高橋英典 和田卓久

発行所/株式会社千代田テクノ

所在地/〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話/03-3816-5210 FAX/03-5803-4890

http://www.c-technol.co.jp/

印刷/株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円 (本体371円)