

# 地下核実験モニターについての 新たな試み

川本 勝

## A New Attempt to Monitor the Underground-Nuclear-Detonation

KAWAMOTO, Masaru

### Abstract

The Nobel Peace Prize for 2017 was awarded to ICAN (International Campaign to Abolish Nuclear weapons) which Japanese group also participated.

However, there are still countries that do the underground-nuclear-detonation while ignoring NPT (Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons) and CTBT (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty).

Underground-Nuclear-Detonations are not reflected in military satellites and military radar, so it is difficult to monitor directly.

Therefore, it was investigated that the possibility of new observation technology to directly monitor the underground-nuclear-detonation.

### 要 約

2017年度のノーベル平和賞は、日本のグループも参加しているICAN（International Campaign to Abolish Nuclear weapons；核兵器廃絶国際キャンペーン）に授与された。

しかし、核兵器不拡散条約（NPT；Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons）や包括的核実験禁止条約（CTBT；Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty）を無視して地下核実験を行っている国が未だ有る。

地下核実験は軍事衛星や軍事レーダーなどには映らないので、直接的に監視することは難しい。

そこで、地下核実験を直接的に監視する新たな観測技術の可能性を調査した。

キーワード

包括的核実験禁止条約 (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty)

チェレンコフ・カウンター (Cherenkov Counter)

地下核実験 (Underground Nuclear Detonation)

モニタリング装置 (Monitoring Device)

ニュートリノ (Neutrino)

## 序論

2017年度のノーベル平和賞は、2017年7月に国連で「核兵器禁止条約 (Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons)」が採択されたことへの貢献が評価されて、スイスのジュネーブに本部があるICAN (International Campaign to Abolish Nuclear weapons; 核兵器廃絶国際キャンペーン) が受賞した (NHK 2017a)。

ここで、ICANとは、彼等のホームページ (核兵器廃絶日本NGO連絡会2017) によれば、「政府に対して核兵器禁止条約の交渉の開始と支持をはたらきかけ、説得し、圧力をかけるために、すべての国の人々を結集する活動をしている全世界的なキャンペーンの連合体で、政府、国際機関、市民社会団体、その他の活動団体に対して：

- 1) 核兵器のいかなる使用も、破滅的な人道および環境の危害を生じることを認めること。
- 2) 核兵器の禁止は、核兵器を保有しない国にとっても、普遍的、人道的な責務であることを認めること。
- 3) 核保有国は、保有する核兵器を完全に廃絶する義務があることを認めること。
- 4) 核兵器禁止条約の交渉のための多国間協議を支援する行動をいまずぐ起こすこと。

等を求めている」組織である。

しかし、このような組織の努力に反して、「核兵器不拡散条約 (NPT; Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons)」 (外務省 2015a) や「包括的核実験禁止条約 (CTBT; Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty)」 (外務省 2015b) を無視し、地下核実験を行っている国が未だ有る。(NHK 2017b)。

ところで、ICBM (InterContinental Ballistic Missile) などのミサイル実験は軍事衛星や軍事レーダー、通信電波などを用いて直接的なモニターが可能であるが、地下核実験は軍事衛星や軍事レーダーなどには映らず、通信電波も発しないので、直接的なモニターは難しい。

これまでは、「地震波の分析」と「事後の大気分析」や「衛星写真」に「当事国の発表」などを組み合わせて総合判断されてきたが、どれも間接的な観測に過ぎず、結局は「当事国の発表」を信用するしか無かった (NHK 2017b)。

このような事情は、地下核実験である限り、どこの国が実施しても同じである。詰まり、紛争地域諸国では、今後も地下核実験は十分に有り得ることである。

そこで、筆者は、地下核実験モニターに関するこれらの現状を踏まえ、地下核実験を直接的にモニターする新たな観測技術が開発できないかを調査してみたところ、有意な結果が得られたの

で、その詳細を下記に報告する。

## 1. 核実験の現状

コトバンクのデジタル大辞泉（小学館）によれば、「核実験」とは、「原子爆弾・水素爆弾などの核兵器の性能や効果を確認するために行う実験」のことである。

一方、コトバンクの世界大百科事典第2版（日立ソリューションズ・クリエイト）によれば、「1945年7月16日、アメリカがニューメキシコ州アラモゴードの砂漠で世界最初の原子爆弾の爆発実験を行って以来、96年6月までに2000回以上の核実験が行われた。74年にインドが行った核実験は平和目的のためのものと発表されたが、現在の段階で軍事目的の核実験と平和目的の核実験を区別することはできない。」とある。

また、同じく、コトバンクの日本大百科全書（服部学）によれば、「核実験の目的には、新しい核兵器の開発、核爆発の効果の検討、貯蔵核兵器の信頼性の確認、安全管理法の確立、人員や施設の機能の維持などがある。これまでに行われた核実験の約3分の2は、新しい核兵器体系の開発に関するものであったと推定されている。」とある。

ところで、外務省（2015a）が公表している「核兵器不拡散条約（NPT；Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons）の概要」によれば、この条約は1963年に国連で採択され、1970年3月5日に発効したが、現在、核実験を成功させたと認められる国は、米国、ロシア、イギリス、フランス、中国とインド、パキスタン、北朝鮮の8か国であるが、この「核兵器不拡散条約」で核兵器保有が認められている国は、国連常任理事国でもある米国、ロシア、イギリス、フランス、中国の5大国のみである。

一方、1996年9月に国連総会で採択された「包括的核実験禁止条約（CTBT；Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty）」（外務省 2015b）によれば、核実験の場所は「宇宙空間（大気圏外）、大気圏内、水中、地下」などに大別されるが、これらのどの場所においても核実験は禁止されている。

また、この条約の規定を実施するために「包括的核実験禁止条約機関（CTBTO）」の設立や、条約遵守の検証の為に、「国際監視制度や現地査察、信頼醸成措置」などから成る検証制度を設けることなどもうたわれている。

2015年6月現在で世界中の183か国が署名し、164か国が批准しているが、米国や中国・イラン・イスラエルなど核兵器保有国を含む「発効要件の44か国」の批准が未だ完了していないため、未だに未発効の状態である。ここで、「発効要件の44か国」とは、同条約の「附属書二」に掲げられているジュネーブ軍縮会議の構成国で、「IAEA（International Atomic Energy Agency：国際原子力機関）」（外務省 2016）が公表している「世界の動力用原子炉」の表に掲げられている国のことである。

日本は、包括的核実験禁止条約には1996年9月に署名し、1997年7月に批准しているが、インドやパキスタン・北朝鮮は未署名・未批准である。

なお、この「包括的核実験禁止条約」（外務省 2015b）には、同条約遵守の検証制度として、  
①国際監視制度

- ②協議および説明
- ③現地査察
- ④信頼醸成についての措置

などが定められているが、

①の「国際監視制度」として、世界中の337ヶ所に下記のような4種類の監視観測所と16の放射性核種監視実験施設が設けられて、核爆発の監視（モニタリング）を行っている。

- i 地震学的監視観測所：地震波を用いて監視
- ii 放射性核種監視観測所：大気中に飛散した放射性核種から監視
- iii 水中音波監視観測所：水中や海中を伝搬する音波を用いて監視
- iv 微気圧振動監視観測所：大気の微妙な振動を用いて監視

これらの監視によって核兵器の実験的爆発や核爆発の発生が検知された場合は、同条約に基づいた「協議と説明」が実施されることになっているが、更には、「現地査察」が実施される場合も有る。

一方、鉱山などで実施されるTNT爆薬などを用いた大規模な爆発と誤認しないために、「信頼醸成措置」の一つとして、鉱山業者はCTBTOに通報することになっている。

ところで、「SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute：ストックホルム国際平和研究所)」(2007)が、1945年～2006年の間に世界中で実施された核実験について集計したデータによれば、この期間に最も多くの核実験を実施した国は米国で、全世界合計2053回の内の1032回(50.27%)であった(表1および図1)。

更に、核実験全体の74.2%は地下実験(表1)で、また、その内の53.51%(表1中の地下核実験1523件の内の815件)は米国によって実施されたものであった。

表1および図1からは、米国とロシア(旧ソビエト連邦)が核実験においても、他から抜きん出た超大国であることが明らかであるが、インドやパキスタン、北朝鮮(朝鮮民主主義人民共和国、本文中では以下「北朝鮮」と省略する)など昨今の地域紛争の当事国が核兵器の保有を目指して核実験を実施していることも否めない。

特に、2001年以降の21世紀に核実験を実施したと認められている国は北朝鮮だけである。

表1

順位	国	核実験回数	全体に占める割合	実施場所別回数	
				大気圏内(含水中)	地下
1	米国	1032	50.27%	217	815
2	ロシア	715	34.83%	219	496
3	フランス	210	10.23%	50	160
4	中国	45	2.19%	23	22
5	イギリス	45	2.19%	21	24
6	インド	3	0.15%	0	3
7	パキスタン	2	0.10%	0	2
8	北朝鮮	1	0.05%	0	1
全世界合計		2053	100.00%	530 25.8%	1523 74.2%

(註) 表1は、SIPRI (2007) が公表しているデータを筆者が表にまとめたものである。

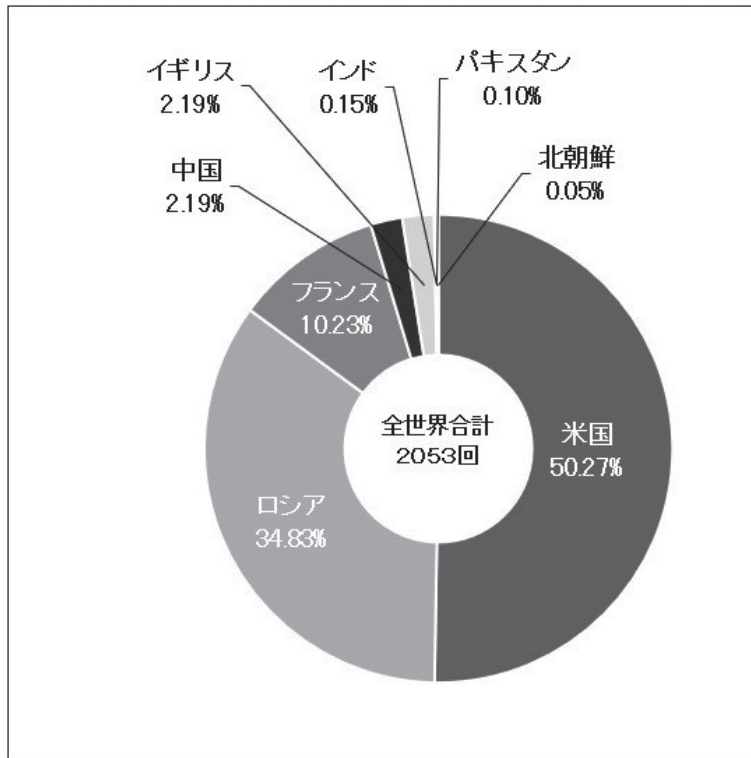


図1

(註) 図1は、表1から筆者がグラフを作成したものである。

そこで、特に、北朝鮮が今迄に実施した核実験について、日本の国土交通省気象庁（2006a～2017b）や防衛省（2017a、2017b）、NHK（2017b）などが公表しているデータを元に筆者がまとめた年表が、下記の表2である。

同じく、表2をもとに、筆者が「北朝鮮の核実験の推移」をグラフにしたのが図2である。

表2および図2から明らかなように、北朝鮮が実施した核実験は全て地下実験であり、しかも、回を重ねる度に、核爆発の規模は大きくなっている。

また、表2をもとに、震動の規模と爆発の規模に着目して、筆者が作成したグラフが図3である。図3から解るように、震動の規模と爆発の規模には相関関係が有る。

NHK（2017b）の報道によれば、「北朝鮮は、核保有国のアメリカと『対等』に渡り合い、体制の保証を取り付けるためには、核兵器を保有しなければならないという考えのもと、過去11年間で6回にわたって核実験を繰り返してきました。このうち4回はキム・ジョウン（金正恩）体制になってから強行されました。」とあり、ICANのような組織の努力とは裏腹に、北朝鮮は包括的核実験禁止条約には未だ未署名・未批准で、地下核実験を繰り返している。

以上のような世界の核実験の現状に鑑みて、今後、核実験の実施を抑止していくためには、特に、地下核実験を監視（モニタリング）することが重要である。

従って、筆者は、次に、地下核実験のモニタリング（監視）について調査した。次節は、その結果である。

表2

No	発生日時		場所			震動の規模 (マグニチュード)	爆発の規模 (TNT火薬換算)	備 考
	発生日付	発生時刻	北緯	東経	深さ			
1	2006年10月09日	10:35:00	41.2	129.2	不明	M4.9	約0.5～1kt	豊浜里(ブンゲリ)の地下で実施、 広島型原爆の15分の1以下
2	2009年05月25日	9:54:40	41.2	129.2	0km	M5.3	約2～3kt	豊浜里(ブンゲリ)の地下で実施、
3	2013年02月12日	11:57:50	41.2	129.3	0km	M5.2	約6～7kt	豊浜里(ブンゲリ)の地下で実施、 金正恩政権で初
4	2016年01月06日	10:29:57	41.3	129.1	0km	M5.0	約6～7kt	豊浜里(ブンゲリ)の地下で実施、 初めての水爆実験?
5	2016年09月09日	9:29:57	41.3	129.2	0km	M5.3	約11～12kt	豊浜里(ブンゲリ)の地下で実施、 初めての核弾頭爆発実験
6	2017年09月03日	12:29:57	41.3	129.1	0km	M6.1	約160kt	豊浜里(ブンゲリ)の地下で実施、 ICBMに搭載するための水爆実験

(註) 表2は、発生日時・場所・震動の規模は国土交通省気象庁(2006a～2017b)が、爆発の規模は防衛省(2017a、2017b)が、備考はNHK(2017b)がそれぞれ公表しているデータを元に、筆者がまとめたものである。

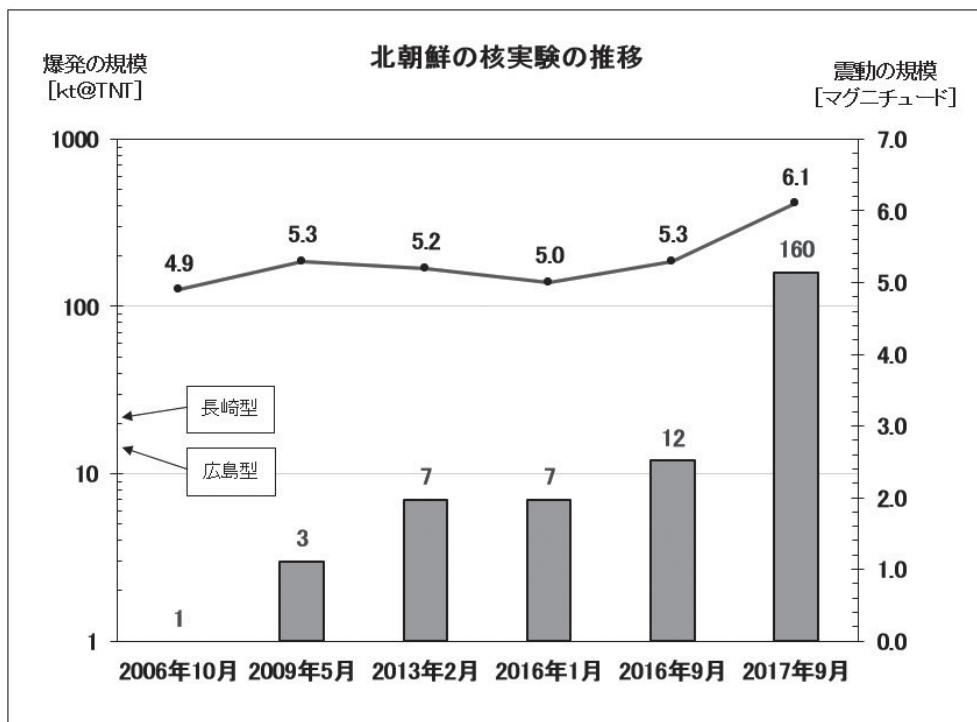


図2

(註) 図2は、筆者が表2を元に作成したグラフである。

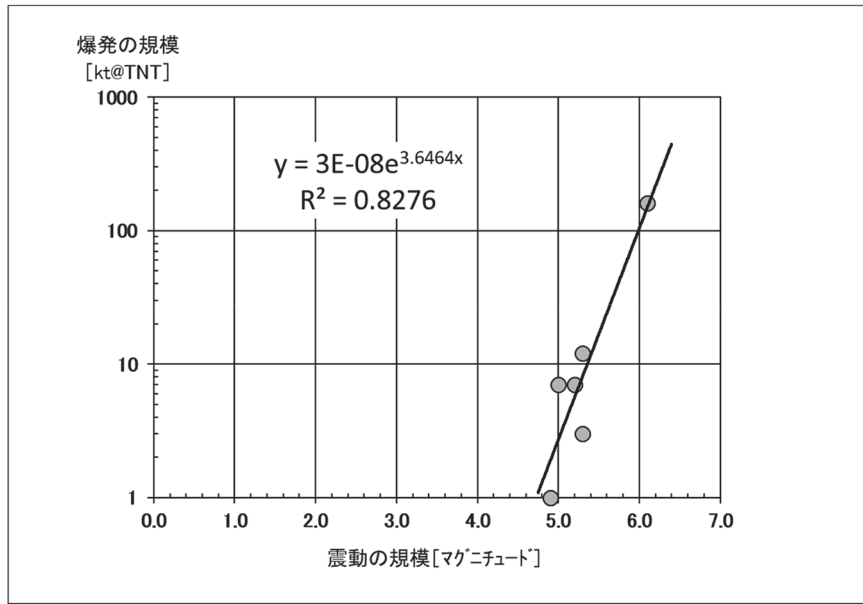


図3

(註) 図3は、筆者が表2を元に震動の規模と爆発の規模に着目して作成したグラフである。

## 2. これまでの地下核実験のモニター方法

「地下核実験 (Underground Nuclear Detonation)」（ブリタニカ国際大百科事典）とは、「原子爆弾や水素爆弾などの核爆弾を地下で爆発させ、その性能などを調べる実験」のことで、現在は、前述の「包括的核実験禁止条約 (CTBT)」で禁止されている。

同じく、前述の「包括的核実験禁止条約」(外務省 2015b)によれば、「国際監視制度」として、世界中の337ヶ所に「地震学的、放射性核種、水中音波、微気圧振動」など4種類の監視観測所と16の放射性核種監視実験施設が設けられて、核爆発の監視 (モニタリング)が行われており、地下核実験についても表1ないし表2のように監視結果が出ている。

日本においても、上記のようなCTBTOの「国際監視制度」に準じて、国土交通省気象庁 (2006a~2017b)が地震波の分析から、日本周辺における地下核実験についての監視 (モニタリング)を行っているが、その同定方法は、地下核実験の実施場所と推定される付近で発生した過去の自然地震のSP波形との「波形比較」により「自然地震ではない」と同定する方法によるもので、もしも、自然地震のSP波形を偽装するような核実験手法が開発された場合には、監視は困難になるという弱点が有る。

また、防衛省 (2017a, 2017b)も核実験によって創生され大気中に飛散した「核実験の二次生成物である放射性核種を含む放射能塵や放射能希ガス」の収集から、日本周辺における地下核実験についての監視 (モニタリング)を行っているが、この方法も、地下核実験の気密性が高くて、これらの「核実験の二次生成物」が地上に漏れ出して飛散することが無ければ、監視は困難であるという弱点が有る。

なお、人工衛星から直接、地下核実験そのものを写真に撮ることは出来ない。

以上のような事実から、地下核実験を単一で直接的に監視できる方法は未だ無い。

日本経済新聞（2016）によれば、「周辺国と敵対するイスラエルも核保有が確実視されている。NPTへの加盟を拒否し、（中略）、ストックホルム国際平和研究所（SIPRI）の推定によると、2015年1月時点で80発の核弾頭を持つとされる。」とあり、イスラエルは地下核実験の監視を逃れている可能性が有る。

以上のような現状を鑑みて、筆者は、次に、地下核実験のモニタリング（監視）について、直接的なモニタリング（監視）方法が開発出来ないか調査した。以下は、その結果である。

### 3. 核爆弾の原理

地下核実験を直接、モニタリング（監視）する方法を開発するためには、先ず、核爆弾の原理を分析する必要がある。

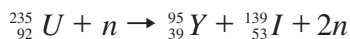
筆者は、核爆弾の原理を調べることで、直接的なモニタリングのプロープ（probe）に成り得る物を探した。以下は、その詳細である。

「原子爆弾（atomic bomb）」（ブリタニカ国際大百科事典）とは、「ウラン、プルトニウムなどの原子核分裂に伴って放出される巨大なエネルギーを利用した爆弾」のことで、「原料としては天然のウランから同位体分離により得られるウラン235、原子炉中に生じるプルトニウム239が用いられ」、また、「広島型（リトルボーイ）はウラン235爆弾で、長崎型（ファットマン）はプルトニウム239爆弾」で、同じく、「1kgのウラン235が完全に核分裂を起せば、およそ  $2 \times 10^{13}$  cal のエネルギーを放出するが、これは TNT 火薬の約 2万 t (20kt) に相当する」。

また、コトバンクの「知恵蔵」（渥美好司2008）によれば、「広島型（リトルボーイ；ウラン235爆弾）は、爆発エネルギーの推定で TNT 火薬換算 16kt 相当」であり、「長崎型（ファットマン；プルトニウム239）は、爆発エネルギーの推定で TNT 火薬換算 21kt 相当」であったとある。

一方、「理化学英和辞典」（小田稔ほか1998）によれば、「核分裂反応（nuclear fission）」とは、「不安定核（重い原子核や陽子過剰核、中性子過剰核など）が分裂してより軽い元素を二つ以上作る反応のことを指す。」とある。

山本義隆（2004）の「新・物理入門 増補改訂版」、ないし、山田克哉（2004）の「核兵器のしくみ」や原島鮮（1975）の「基礎物理学Ⅱ」などによれば、「ウラン235の核分裂の素過程」は、ウラン235に中性子を1個吸収させると、ウラン原子は大変不安定になり、二つの原子核（これを、「核分裂生成物」という）と幾つかの高速中性子に分裂する。ウラン235の核分裂反応には下記のように幾つかの種類があり、それらの核分裂反応は確率的に起こる。



ここで、Uはウラニウム、Yはイットリウム、Iはヨウ素、Srはストロンチウム、Xeはキセノ



ン、Krはクリプトン、Baはバリウムを表す元素記号である。また、nは中性子を表す。

また、上式で元素記号の左肩に示した数字は質量数で、原子核の中に存在する陽子と中性子の和（核子数の和）であり、核分裂反応で右辺と左辺の核子数は等しく、核分裂反応の前後において質量数は厳密に保存する。同じく、上式で元素記号の左足元に示した数字は原子番号で、原子核内に存在する陽子の数を表す。

ところで、原子核内に存在する陽子と中性子は核力によって強く結合しているため、この「核子の結合エネルギー」の分だけ、実際の原子核の質量は一般に質量数である陽子と中性子の質量の総和よりも小さくなる。

この質量差を「質量欠損」と呼ぶが、この「質量欠損」と「核子の結合エネルギー」の間には、アインシュタインの特殊相対性理論による「質量とエネルギーの等価性  $E = mc^2$ 」の関係があり、核反応が起こって反応の前後でこの「質量欠損」が変化すると、この特殊相対論による質量とエネルギーの等価性によってその分のエネルギーが解放される。この関係を利用したのが核爆弾である。

即ち、分裂前と分裂後の質量の差は結合エネルギーの差であり、核分裂を起こすとこの質量の差に相当するエネルギーが外部に放出される。

上記の過程の質量差をエネルギーに換算すると、ウランの核分裂反応で放出されるエネルギーはウラン原子1個当たり約200MeVとなり、1MeVは $1.6 \times 10^{-13}$ JジュールJに等しいので、換算すると $3.2 \times 10^{-11}$ Jとなる。

1グラムの単一の物質に含まれる原子数はアボガドロ定数 $N_A$ を質量数Aで割ることで与えられるから、

$$\frac{N_A}{A} = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{235 \text{ g/mol}} = 2.56 \times 10^{21} \text{ g}^{-1}$$

より、1グラムのウラン235の中には $2.56 \times 10^{21}$ 個の原子核が含まれることがわかる。

この1グラムのウラン235が全て核分裂を起こすと

$$(3.2 \times 10^{-11} \text{ J}) \times (2.56 \times 10^{21} \text{ g}^{-1}) = 8.2 \times 10^{10} \text{ J/g}$$

と、およそ $8.2 \times 10^{10}$ Jのエネルギーが生まれる事になるが、これはカロリー値に換算すれば、1calは4.184Jなので、およそ $2 \times 10^{10}$ calである（ウラン235が1kgの場合は、 $2 \times 10^{13}$ cal）。

一方、上述のように、ウラン235の核分裂反応には幾つかの種類があり、それらの核分裂反応は確率的に起こるので、それらを平均すると、1個のウラン235の核分裂反応では平均して2.5個の中性子が二次生成物として発生する。

これらの高速中性子が別のウラン235に作用すれば、このような核分裂反応は極短時間の内にカスケード（cascade：連鎖）的に進む（これを、「核分裂連鎖反応」という）。

この原理を利用したものが、ウラン235を用いた原子爆弾であるが、この高速中性子を制御して、ウラン235の核分裂反応がゆっくり進むようにしたものが「原子炉」である。

今回の調査で解った、ウラン235を用いた原子爆弾についての以上のような原理から、1個のウラン235の核分裂反応では平均して2.5個の高速中性子が二次生成物として発生するから、1グラムのウラン235からは、平均的に、

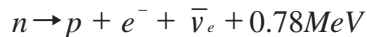
$$2.5 \times 2.56 \times 10^{21} \text{個} = 6.4 \times 10^{21} \text{個}$$

の高速中性子が二次生成物として発生することが解った。

ところで、中性子は電荷を持たないが核力を持つため、地下核実験の場合は地中の高密度な岩石などの原子核と衝突を繰り返して減速したり吸収されたりする（江尻宏泰2012）。

また、中性子は原子核から飛び出ると $8.87 \times 10^2$ 秒（約15分）の寿命で $\beta$ 崩壊し、陽子と電子（これを「 $\beta$ 線」という）、反電子ニュートリノになる（日本アイソトープ協会1992）。

その反応式は、下記のようになる。



ここで、陽子や電子は電荷を持っているため電磁相互作用を起こして速やかに物質中に吸収されてしまうが、反電子ニュートリノは電荷や核力を持たない比較的軽い素粒子なので、物質中に吸収されずに、原子爆弾の起爆点からそのまま大量に放出されると考えられる。

勿論、上記の「核分裂生成物」も放射能を持っているので、それらは $\beta$ 崩壊を通して反電子ニュートリノを放出する。

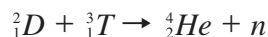
つまり、今回の調査で、ウラン235を用いた原子爆弾については、反電子ニュートリノがモニタリングの直接的なプローブ（probe：探り針）に成り得ることが解った。

同様に、プルトニウム原爆の場合は、山田克哉（2004）の「核兵器のしくみ」によれば、プルトニウム239が中性子1個を吸収して核分裂を起こすと、平均2.8個の中性子が放出される。

プルトニウム239の方がウラン235より質量数は大きいですが、核分裂で放出される中性子の数はプルトニウム239の方が多いので、結果的には、プルトニウム原爆の場合もウラン原爆と同様に大量の反電子ニュートリノが放出されることが解る。

つまり、今回の調査で、プルトニウム239を用いた原子爆弾についても、反電子ニュートリノがモニタリングの直接的なプローブ（probe）に成り得ることが解った。

同じく、水素爆弾の場合は、山田克哉（2004）の「核兵器のしくみ」によれば、重水素（D；Deuterium）と三重水素（T；Tritium）の原子核の核融合反応からヘリウムと中性子がそれぞれ1個生成される。



重水素や三重水素の方がウラン235より質量数は遥かに小さいので、この核融合反応で放出される中性子の数はウラン235より少ないが、結果的には、水素爆弾の場合もウラン原爆と同様に大量の反電子ニュートリノが放出されることが解る。

つまり、今回の調査で、水素爆弾についても、反電子ニュートリノがモニタリングの直接的なプローブ（probe）に成り得ることが解った。

以上のような今回の調査結果から、原子爆弾や水素爆弾の地下実験においては、その二次生成物である中性子が $\beta$ 崩壊して発生した大量のニュートリノがモニタリングの直接的なプローブ（probe）に成り得ることが解った。

そこで、筆者は、次に、このニュートリノを観測する手法を調査した。

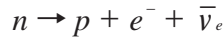
## 4. ニュートリノの特徴と検出方法の原理

中村健蔵 (1994) の「ニュートリノで探る宇宙」によれば、ニュートリノには

- 電子ニュートリノ  $\nu_e$
- ミューニュートリノ  $\nu_\mu$
- タウニュートリノ  $\nu_\tau$

の3種類が有り、それぞれに反粒子が存在するが、いずれも電荷が無く（従って、電磁相互作用が無く）、強い相互作用も無く、弱い相互作用と重力しか働かないため、地球も貫通するほど貫通力が強い。

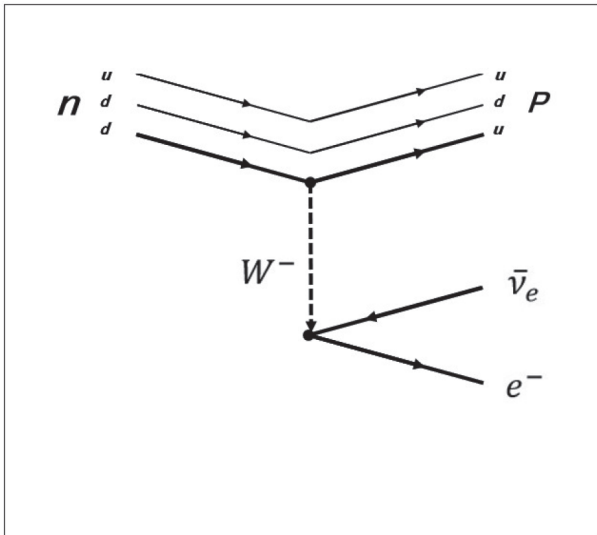
ところで、「 $\beta$ 崩壊」とは、弱い相互作用におけるウィークボソン  $W^-$  の媒介によって、中性子が陽子に崩壊して、電子（これを「 $\beta$ 線」という）と反電子ニュートリノが発生する現象のことである。



中村健蔵 (1994) の「ニュートリノで探る宇宙」や日本物理学会編 (1997) の「ニュートリノと重力波」などを参考に、筆者がこの素粒子の相互作用をクォークレベルで「ファインマン・ダイアグラム (Feynman Diagram)」(中西襄1993) に図示したものが図4である。ただし、この図中で、時間軸は左から右に向かっている。

この図中で、中性子は1個のアップクォーク (u) と2個のダウルクォーク (d) が組み合わさった3個のクォーク (udd) で構成されているが、陽子は2個のアップクォーク (u) と1個のダウルクォーク (d) が組み合わさった3個のクォーク (udu) で構成されている。

中性子の  $\beta$  崩壊では、中性子中のダウルクォーク (d) 1個がウィークボソン  $W^-$  を放出してアップクォーク (u) に遷移し、放出された  $W^-$  は電子と反電子ニュートリノに崩壊する。



**図4**  
 (註) 図4は、筆者が、中村健蔵 (1994) や日本物理学会編 (1997)、中西襄 (1993) などの著書を参考にして、「中性子の  $\beta$  崩壊」をクォークレベルで「ファインマン・ダイアグラム」に図示したものである。

一方、電子ニュートリノは、中性のウィークボソン $Z^0$ ないし荷電ウィークボソン $W$ の媒介によって、電子と弾性散乱をする。この素粒子反応は、反電子ニュートリノの場合も同様である。

$$\nu + e \rightarrow \nu + e$$

前述の中性子の $\beta$ 崩壊と同様、中村健蔵（1994）の「ニュートリノで探る宇宙」や日本物理学会編（1997）の「ニュートリノと重力波」などを参考に、筆者がこの素粒子の相互作用を「ファインマン・ダイアグラム」に図示したものが図5である。

電子ニュートリノがウィークボソンの媒介によって電子と弾性散乱をする場合は、図5のように、3種類のモードがある。ただし、この図中で、時間軸は左から右に向かっている。

つまり、反電子ニュートリノは物質中の電子を「弾き飛ばす」ことが出来る。

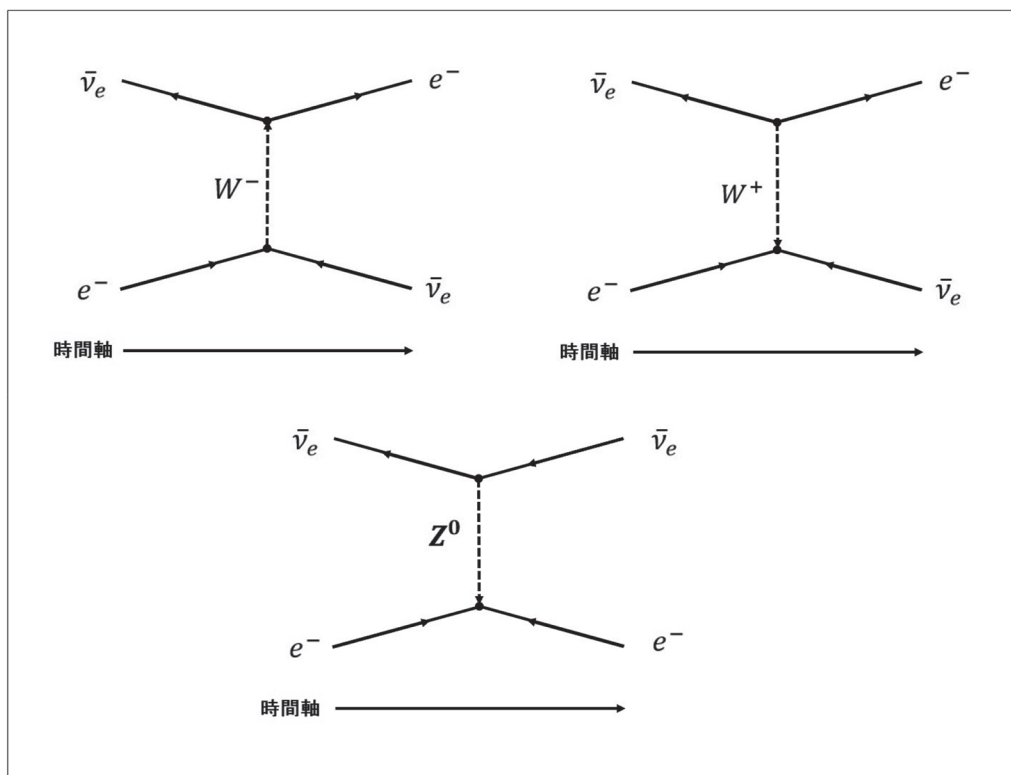


図5

（註）図5は、筆者が、中村健蔵（1994）や日本物理学会編（1997）、中西襄（1993）などの著書を参考にして、「反電子ニュートリノと電子の弾性散乱」を「ファインマン・ダイアグラム」に図示したものである。

ところで、一般に、荷電粒子は、物質中を $v = \beta c$ の速度で移動するため、物質の屈折率を $n$ とすると、 $v > c/n$ の場合、電磁相互作用によって、その進行方向にその物質特有のチェレンコフ（Cherenkov）光を出すことが、よく知られており、このような原理を用いた荷電粒子の検出器のことを「チェレンコフ・カウンター」と呼んでいる（山本祐靖1973、加藤貞幸1994）。

このチェレンコフ光の発生角度； $\theta_c$ は、

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

で与えられる。

因みに、加藤貞幸（1994）によれば、物質が水の場合は、屈折率  $n$  は 1.34、電子がチェレンコフ光を発生する臨界エネルギーは 0.25 MeV、チェレンコフ光の発生角度  $\theta_c$  は  $\beta = 1$  の時、42 度である。

山本祐靖（1973）の「高エネルギー物理学」や、加藤貞幸（1994）の「放射線計測」を参考に、筆者がチェレンコフ光の原理を図示したものが図 6 である。

チェレンコフ光は、電子の進行方向に対して  $\theta_c$  の角度で発生し、半径  $R = ct \cdot \sin \theta_c$  の光の環を作る。

従って、物質中を  $v = \beta c$  の速度で移動する電子は、進行方向に  $\theta_c$  の角度で円錐形の光面をしたチェレンコフ光を発生しながら移動する。

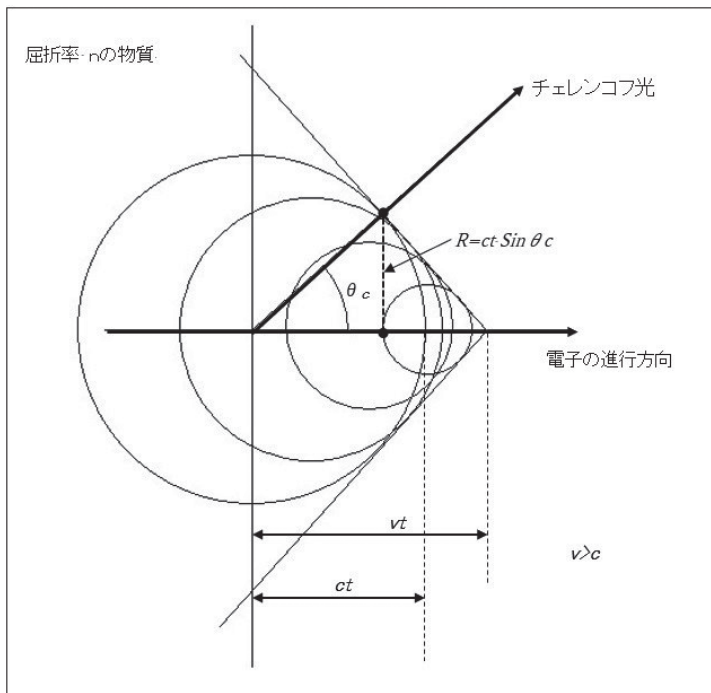


図 6  
 (註) 図 6 は、筆者が、山本祐靖（1973）や加藤貞幸（1994）の著書を参考にして、「チェレンコフ光の原理」を図示したものである。

そこで、反電子ニュートリノによって弾き出される電子とチェレンコフ光を発生させる物質に水を選べば、チェレンコフ光を測定することは比較的容易であるが、この方法は既に小柴博士が率いた東京大学宇宙線研究所グループの「カムイオカンデ実験」や「スーパーカムイオカンデ実験」で実用されており、著名な結果を数多く出している（横山広美 2006、鈴木厚人 2016）。

一方、ウラン 235 を用いた原子爆弾からは、1 グラムのウラン 235 当たり、およそ  $6.4 \times 10^{21}$  個の高速中性子が 2 次生成物として発生することが、既に前述の調査結果で解っている。

永江知文ほか（2000）の「原子核物理学」によれば、この高速中性子のエネルギー分布はマク

スウェル分布に近く、平均エネルギーは約1 MeVである。

また、中性子は電荷を持たないが核力を持つため、地下核実験の場合は地中の高密度な岩石などの原子核と衝突を繰り返して減速したり吸収されたりしながら、 $8.87 \times 10^2$ 秒（約15分）の寿命（半減期は約10.3分）で $\beta$ 崩壊し、陽子と電子、反電子ニュートリノになることが、既に前述の調査結果で解っている。

詰まり、ウラン235を用いた原子爆弾から放出された大量の中性子の多くから反電子ニュートリノが2次発生し、それら大量の反電子ニュートリノはそのまま地球を貫通して地下核実験のモニタリング場所に飛来する。このような結果は、プルトニウム原爆や水素爆弾の場合も同様である。

仮に、地下核実験で試爆させられた核爆弾の大きさが「半径1mの球体」であると仮定すると、1,000km先で単位面積当たりを通過する反電子ニュートリノの数は爆発点での数に比べて、半径 $r$ の球の表面積 $S$ は $S = 4\pi r^2$ の公式で与えられるので、

$$\left(\frac{1}{10^6}\right)^2 = 10^{-12}$$

となるが、

元中性子数は、およそ $10^{21}$ 個のオーダーであるので、地下核実験場から1,000km離れた先でも、反電子ニュートリノは $10^9$ 個のオーダーで飛来すると見積もることが出来る。

また、反電子ニュートリノの親である高速中性子のエネルギー分布はマクスウェル分布に近く、平均エネルギーは約1 MeVであるので、10MeV以上のエネルギーを持つ高速中性子も少なくともその1/100程度は存在する。

詰まり、地下核実験場から1,000km離れた先でも、10MeV以上のエネルギーを持つ反電子ニュートリノは単位面積当たり $10^7$ 個近くのオーダーで飛来すると見積もることが出来る。

ところで、内閣府（2003）の報告書「原子力のすべて」によれば、「広島型原爆ではウラン235が約60kg使用され、TNT火薬に換算して15～16ktに相当する爆発を起こした」とされるから、この場合、 $60\text{kg} = 6 \times 10^4\text{g}$ なので、放出された高速中性子の数は $3.8 \times 10^{26}$ 個となり、広島型原爆と同様の地下核実験が行われた場合、1,000km離れた先に飛来する10MeV以上のエネルギーを持つ反電子ニュートリノの数は単位面積（ $1\text{m}^2$ ）当たり $10^{11} \sim 10^{12}$ 個（およそ1兆個）のオーダーであると見積もることが出来る。

以上の調査から、地下核実験に由来する反電子ニュートリノによって弾き飛ばされた水中の電子が発するチェレンコフ光を測定すれば、地下核実験を直接的にモニタリングできることが解った。

## 5. 地下核実験をモニタリングする装置

今回の調査から、上述のように、「地下核実験で発生した大量の反電子ニュートリノによって弾き出された電子のチェレンコフ光を測定する方法」を用いて、「地下核実験の直接的なモニタリング」が可能であることが解ったので、下記に、そのモニター装置の具体的なアレンジメント

を考察する。

三浦功ほか（1960）の「放射線計測学」ないしは加藤貞幸（1994）の「放射線計測」や山本祐靖（1973）の「高エネルギー物理学」などによれば、電子のチェレンコフ光を測定するには、下記の図7のように、「電子がチェレンコフ光を発する物質」と「チェレンコフ光を検出する光電子増倍管（PMT：Photo-Multiplier-Tube）」を組み合わせる検出器を作る。

前述したように、加藤貞幸（1994）によれば、この物質が水の場合は、屈折率 $n$ は1.34、電子

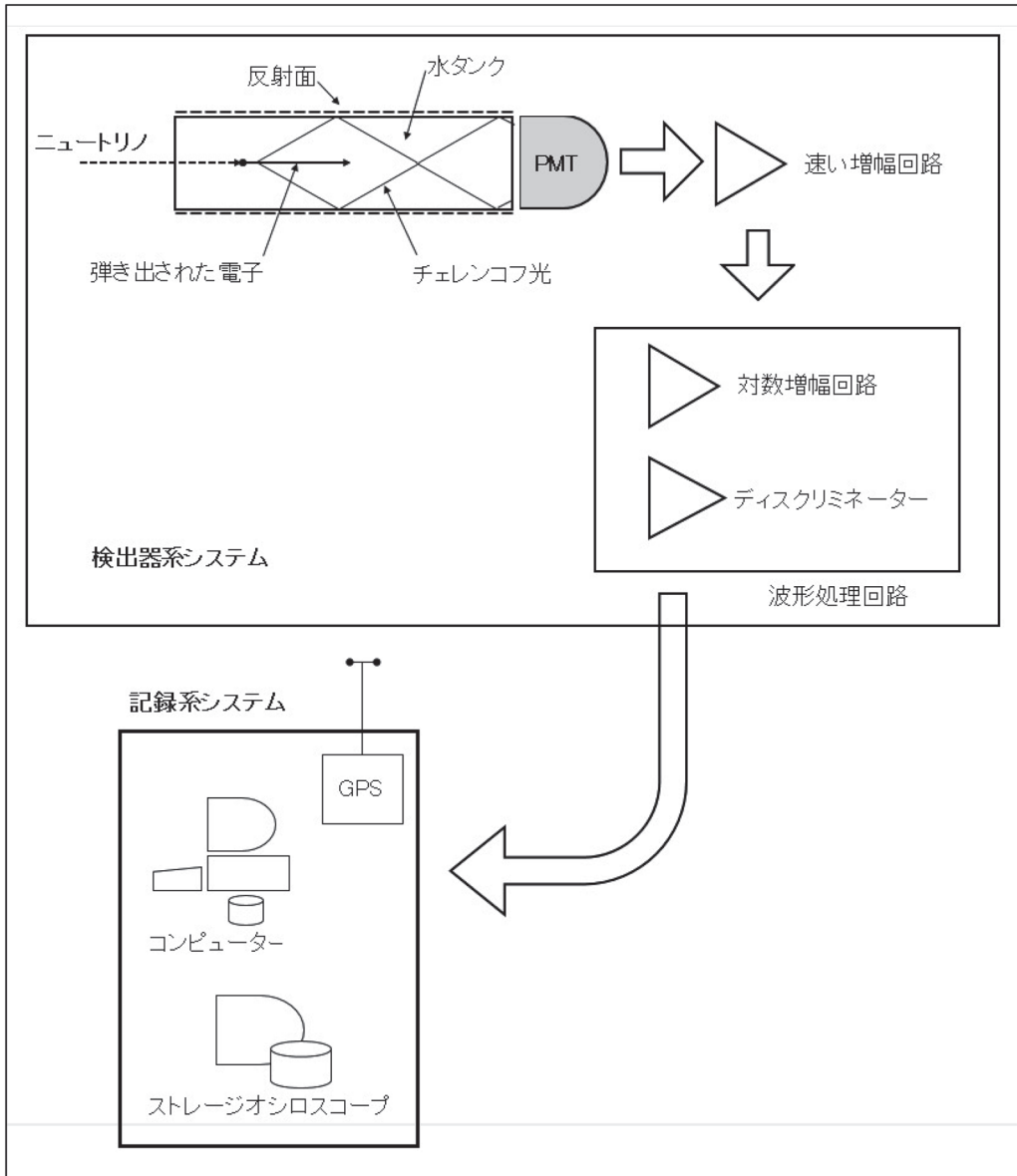


図7

(註) 図7は、筆者が、三浦功ほか（1960）や加藤貞幸（1994）、山本祐靖（1973）などの著書を参考にして、「地下核実験で発生した大量の反電子ニュートリノによって弾き出された電子のチェレンコフ光を測定する装置」を図示したものである。

がチェレンコフ光を発生する臨界エネルギーは0.25MeV、チェレンコフ光の発生角度； $\theta_c$ は $\beta = 1$ の時、42度である。

光電子増倍管から出た電気信号の波形は、「速い増幅回路」を用いて増幅され、「対数増幅回路」を通して波高が測定されたり、「ディスクリミネーター」を通して記録する波形を選別されたりすることが出来る。

また、光電子増倍管から出た電気信号の波形は、デジタルストレージオシロスコープなどを用いることによって、その波形そのものを記録することや、デジタル化した波形データをコンピュータ処理することも可能である。

更には、GPS（Global Positioning System；全地球測位システム）を用いることによって、「モニター装置」の設置場所や検出時刻を良好な精度で記録することもできる。

なお、下記の図8のように、このような「モニター装置」を複数組み合わせると、設置場所と検出時刻の差から、反電子ニュートリノの「到来方向 $\theta$ 」を算出することが可能である。

図8において、 $\beta C$ はニュートリノの速度、 $\theta$ はニュートリノの到来方向、①、②、③はモニター装置、 $L$ は各モニター装置間の設置間隔、 $T_2$ 、 $T_3$ はニュートリノが到来した時間差とすると、

$$T_2 = \frac{L}{\beta C} \sin \theta$$

$$T_3 = \frac{2L}{\beta C} \sin \theta$$

となるので、

複数のモニター装置で観測すれば、到来方向は精度良く求まる。

ここでは、考察を簡略化するために2次元上で $\theta$ のみを求めたが、3次元上では同様に、天頂角 $\theta$ と方位角 $\phi$ が求まる。

更に、このような複数の「モニター装置」から成る観測施設を下記の図9のように複数の場所に設置すれば、「三角測量の原理」（ブリタニカ国際大百科事典）を応用して、それぞれに求まった到来方向のデータから地下核実験の「場所と実験日時」を精度良く求める事も可能である。

ところで、鈴木厚人（2016）の「カミオカンデとニュートリノ」によれば、チェレンコフ光を用いてニュートリノを観測する場合、ニュートリノによる事象を濁す、下記のような種々のバックグラウンドが問題となる。

- ①宇宙から地球に降り注ぐ素粒子群（これを「一次宇宙線」という）と、それによって二次発生する種々の素粒子群（これを「二次宇宙線」という）。これらは、水タンク中でチェレンコフ光を発生する。
- ②一次宇宙線によって大気で二次発生する大気ミューオンないし大気ニュートリノ
- ③太陽ニュートリノ
- ④水中に含まれる放射性物質の自然崩壊で発生する $\beta$ 線（電子）
- ⑤地下の岩盤中に含まれる放射性物質の自然崩壊で発生する $\beta$ 線（電子）
- ⑥超新星爆発で発生したニュートリノ



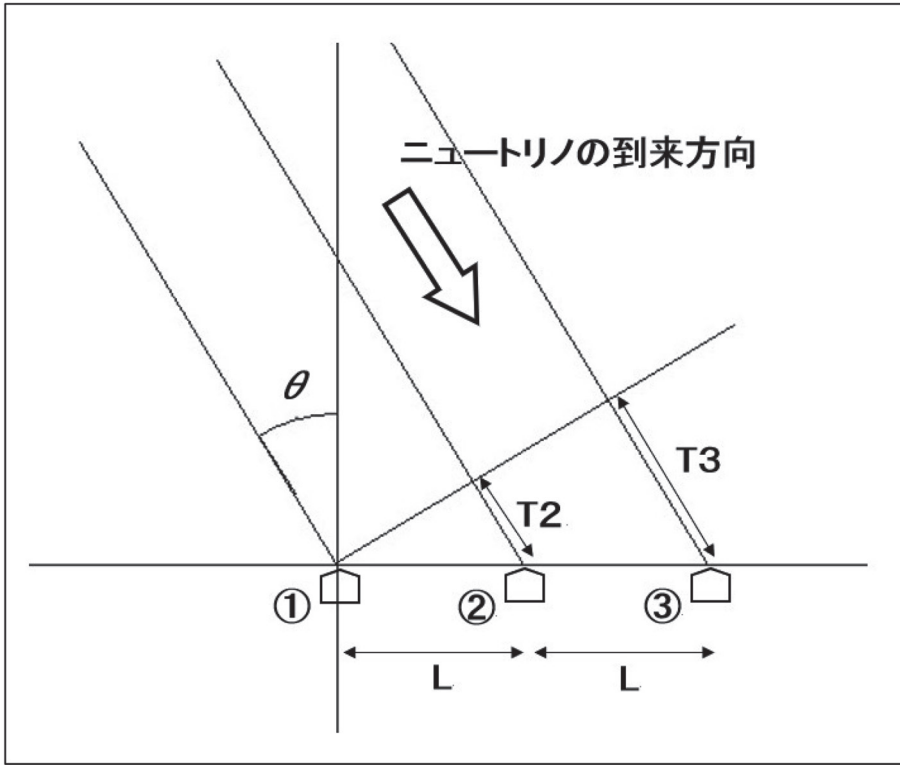


図8

(註) 図8は、筆者が「反電子ニュートリノの到来方向 $\theta$ を算出する原理」を図示したものである。

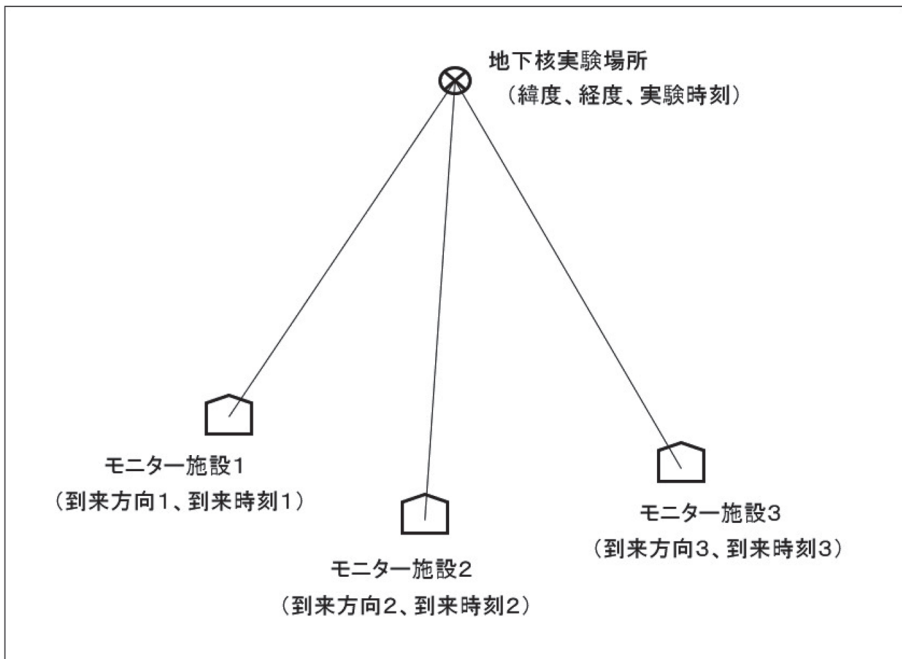


図9

(註) 図9は、筆者が「地下核実験の場所と実験日時を求める原理」を図示したものである。

そこで、①の問題は、カミオカンデと同じく、モニタリング装置を地下深くに設置することで解消可能である。

一方、②の問題については、これらは降り注ぐ頻度が天頂からが最大で水平線以下では減少するが、地下核実験で発生したニュートリノは水平線付近から飛来するという特性と、チェレンコフ光は指向性が強いという特性を利用して、到来方向で弁別できるようにモニタリング装置をアレンジすることで解消可能である。

また、③の問題については、太陽との被りをチェックすることで解消が可能である。

更に、④の問題については、このような $\beta$ 崩壊は統計的にランダムに発生するため、図7のような検出器を図8のように複数組み合わせることで「同時検出」できなかった事象は除外することで解消が可能である。

⑤の問題も④の問題と同じ方法で除外が可能であるが、モニタリング装置を岩盤から発生する $\beta$ 線（電子）が届かない距離に離すことでも除外が可能である。

⑥の問題は、③の問題と同じく、超新星爆発との被りをチェックすることで解消が可能である。

以上の調査結果から、地下核実験によって発生したニュートリノによる事象を濁す種々のバックグラウンドが除外できれば、上記に詳述したような装置によって地下核実験を直接的にモニタリング（監視）することは可能であることが解った。

なお、このモニタリング（監視）方法は、地下核実験で二次発生したニュートリノを直接的に検出する方法なので、ニュートリノの発生を伴わない「核実験を偽装した通常火薬による爆発」や「地震や火山現象を偽装した地下核実験」を識別できる可能性もある。

ただし、この新しい「モニタリング（監視）装置」の開発に当たっては、光電子増倍管など各 부품の入手に関する法律（規制）などが未調査なので、今後の重要な課題である。

## 結論

今回の調査では、核爆弾の原理と核爆弾によって二次発生するニュートリノの特徴を知ること、従来の地震波測定などによる間接的なモニタリング（監視）ではなく、地下核実験で二次発生したニュートリノを利用して地下核実験をリアルタイムに直接検出する「モニタリング（監視）装置」の開発が可能であることが解った。

また、この「モニタリング（監視）装置」を複数組み合わせた「モニタリング施設」を複数個所に設置することで、地下核実験が行われた場所や日時を特定することも可能であることが解った。

なお、このモニタリング（監視）方法は地下核実験で二次発生したニュートリノを直接的に検出する方法なので、ニュートリノの発生を伴わない「核実験を偽装した通常火薬による爆発」や「地震や火山現象を偽装した地下核実験」を識別できる可能性もある。

しかし、この新しい「モニタリング（監視）装置」の開発に当たっては、光電子増倍管など各 부품の入手に関する法律（規制）などが未調査なので、今後の重要な課題である。

## 参考文献

- 渥美好司、「原子爆弾」、『コトバンク (知恵蔵)』、(株)朝日新聞出版、2008  
<https://kotobank.jp/word/原子爆弾> (Accessed 2017.10.20)
- 防衛省、「北朝鮮による核実験・弾道ミサイル発射について」、2017a  
[http://www.mod.go.jp/j/approach/surround/pdf/dprk\\_bm\\_20170922.pdf](http://www.mod.go.jp/j/approach/surround/pdf/dprk_bm_20170922.pdf) (Accessed 2017.10.11)
- 防衛省、「北朝鮮の核実験に係る放射能特別調査の実施について」、2017b  
<http://www.mod.go.jp/j/press/news/2017/09/03a.html> (Accessed 2017.10.11)
- ブリタニカ国際大百科事典、「原子爆弾」、『コトバンク (ブリタニカ国際大百科事典)』  
<https://kotobank.jp/word/原子爆弾> (Accessed 2017.10.20)
- ブリタニカ国際大百科事典、「3角測量の原理」、『コトバンク (ブリタニカ国際大百科事典)』  
<https://kotobank.jp/word/3角測量の原理> (Accessed 2017.11.14)
- ブリタニカ国際大百科事典、「地下核実験」、『コトバンク (ブリタニカ国際大百科事典小項目事典)』  
<https://kotobank.jp/word/地下核実験> (Accessed 2017.11.14)
- 江尻宏泰、「ビックリするほど原子力と放射線がわかる本」、『サイエンス・アイ新書』、ソフトバンククリエティブ、2012
- 外務省、「核兵器不拡散条約 (NPT) の概要」、2015a  
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaku/npt/gaiyo.html> (Accessed 2017.10.28)
- 外務省、「包括的核実験禁止条約 (CTBT; Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty)」、2015b  
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaku/ctbt/> (Accessed 2017.10.28)
- 外務省、「国際原子力機関 (IAEA) の概要」、2016  
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/atom/iaea/> (Accessed 2017.10.28)
- 原島鮮、「基礎物理学Ⅱ」、学術図書出版社、1975
- 服部学、「核実験」、『コトバンク (日本大百科全書)』、小学館  
<https://kotobank.jp/word/核実験> (Accessed 2017.10.20)
- 日立ソリューションズ・クリエイト、「核実験」、『コトバンク (世界大百科事典第2版)』、  
<https://kotobank.jp/word/核実験> (Accessed 2017.10.20)
- 核兵器廃絶日本NGO連絡会、「核兵器廃絶国際キャンペーン (ICAN) の概要をご紹介します」、2017  
<https://nuclearabolitionjpn.wordpress.com/2013/01/14/about-ican-in-japanese/> (Accessed 2017.10.6)
- 加藤貞幸、「放射線計測」、『新物理学シリーズ26』、培風館、1994
- 国土交通省気象庁、「北朝鮮関連の地震波形分析結果」、『報道発表資料』、国土交通省気象庁のホームページ、平成18 (2006a) 年10月9日  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0610/09a/20061009kitachosen.html> (Accessed 2017.10.11)
- 国土交通省気象庁、「10月9日10時35分頃の震動波形について」、『報道発表資料』、国土交通省気象庁のホームページ、平成18 (2006b) 年10月11日  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0610/11a/20061011kitachosen.html> (Accessed 2017.10.11)
- 国土交通省気象庁、「平成21年5月25日09時55分頃の震動波形について」、『報道発表資料』、国土交通省気象庁のホームページ、平成21 (2009a) 年5月25日12時05分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0905/25a/kaisetsu05251205.html> (Accessed 2017.10.11)
- 国土交通省気象庁、「平成21年5月25日09時55分頃の震動波形について (第2報)」、『報道発表資料』、平成21 (2009b) 年5月25日18時00分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0905/25b/kaisetsu05251800.html> (Accessed 2017.10.11)
- 国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について」、『報道発表資料』、平成25 (2013a) 年2月12日12時30分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1302/12c/2013021121230.html> (Accessed 2017.10.11)
- 国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について (第2報)」、『報道発表資料』、平成25 (2013b) 年2月12日13時30分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1302/12d/2013021121330.html> (Accessed 2017.10.11)
- 国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について」、『報道発表資料』、平成28 (2016a)

- 年1月6日11時30分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1601/06a/201601061130.html> (Accessed 2017.10.11)  
国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について(第2報)」、『報道発表資料』、平成28(2016b)年1月6日12時30分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1601/06b/201601061230.html> (Accessed 2017.10.11)  
国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について(第3報)」、『報道発表資料』、平成28(2016c)年1月6日16時40分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1601/06c/201601061640.html> (Accessed 2017.10.11)  
国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について」、『報道発表資料』、平成28(2016d)年9月9日9時55分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1609/09a/201609090955.html> (Accessed 2017.10.11)  
国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について(第2報)」、『報道発表資料』、平成28(2016e)年9月9日11時00分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1609/09b/2016090901100.html> (Accessed 2017.10.11)  
国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について」、『報道発表資料』、平成29(2017a)年9月3日13時10分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1709/03a/201709031310.html> (Accessed 2017.10.11)  
国土交通省気象庁、「北朝鮮付近を震源とする地震波の観測について(第2報)」、『報道発表資料』、平成29(2017b)年9月3日14時15分  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1709/03b/201709031415.html> (Accessed 2017.10.11)  
三浦功、菅浩一、俣野恒夫、「放射線計測学」、『物理学選書7』、裳華房、1960  
永江知文、永宮正治、「原子核物理学」、『裳華房テキストシリーズ-物理学』、裳華房、2000  
内閣府、「原子力のすべて」、原子力のすべて編集委員会、2003  
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/sonota/study/aecall/index.html> (Accessed 2017.11.14)  
中村健蔵、「ニュートリノで探る宇宙」、『NewCosmosSeries8』、培風館、1994  
中西襄、「ファインマン・ダイアグラム」、『パリティ物理学コース・クローズアップ』、丸善、1993  
NHK、「ノーベル平和賞にNGO『核兵器廃絶国際キャンペーン』」、『NHK News Web』、2017a  
<http://www3.nhk.or.jp/news/html/20171006/k10011170511000.html> (Accessed 2017.10.10)  
NHK、「緊迫 北朝鮮情勢」、『NHK News Web』、2017b  
[https://www3.nhk.or.jp/news/special/northkorea\\_provocation/](https://www3.nhk.or.jp/news/special/northkorea_provocation/) (Accessed 2017.10.10)  
日本アイソトープ協会、「放射線・アイソトープ講義と実習」、日本アイソトープ協会、丸善、1992  
日本物理学会、「ニュートリノと重力波」、日本物理学会編、裳華房、1997  
日本経済新聞、「核拡散止まらず、インドやパキスタン、増え続ける保有国」、『アジアニュース』、2016/1/6  
<http://mw.nikkei.com/> (Accessed 2017.11.02)  
小田稔ほか、「nuclear fission(核分裂反応)」、『理化学英和辞典』、研究社、1998  
SIPRI、「NUCLEAR ARMS CONTROL AND NON-PROLIFERATION」、『SIPRI Yearbook2007』、2007  
<https://www.sipri.org/yearbook/2007/12> (Accessed 2017.10.28)  
鈴木厚人、「カミオカンデとニュートリノ」、丸善、2016  
小学館、「核実験」、『コトバンク(デジタル大辞泉)』  
<https://kotobank.jp/word/核実験> (Accessed 2017.10.20)  
山田克哉、「核兵器のしくみ」、『講談社現代新書1700』、講談社、2004  
山本祐靖、「高エネルギー物理学」、『新物理学シリーズ14』、培風館、1973  
山本義隆、「ウラン235の核分裂の素過程」、『新・物理入門 増補改訂版』、駿台文庫、2004  
横山広美、「よくわかる素粒子の基本と仕組み」、『図解入門』、(株)秀和システム、2006