

北朝鮮の核爆発実験は失敗か？成功か？

軍縮・不拡散促進センター
客員研究員 小山謹二

はじめに

本稿は平成 18 年 10 月 25 日（財）日本国際問題研究所が開催した JIA フォーラム「北朝鮮と核問題」で行った報告に手を加えたものであり、北朝鮮が 10 月 9 日に行なった核爆発実験について報道された情報をベースに分析し、科学的な見地から核爆発実験の分析と評価を試みたものである。分析の対象とした情報は地震の規模、震源位置、そして核爆発にともない生成される放射性物質の検知に関するものである。情報を体系的に分析したところ「核爆発実験が失敗である」と結論付ける根拠を見付けることは出来なかった。実験を行った場所の地層と地質、そしてトンネル（地下ドーム）に関する情報がないため、爆心地の地質と核爆発装置を設置した地下ドームの大きさ等を推定し、核爆発によって誘起された地震の規模の補正を試みた。分析評価の結果として、核爆発実験は失敗ではない、予告された核爆発規模 4kt の爆発は推定誤差の範囲内で起きており、個人的な見解であるが、核爆発実験は及第点を取っている。

なお、報道された主要な観測結果とその分析は「北朝鮮の核爆発実験に関する資料等」（以下、資料）として添付してある。

観測結果の評価

先ず第 1 に指摘しておかなければならない点は「核爆発実験が失敗であると結論付ける根拠が無い」ことである。そして、爆発実験を行った場所等に関する情報がまったくないことである。地震の規模から爆発の規模を求めるためには、爆発のエネルギーが地震波のエネルギーに轉換される割合（エネルギー轉換率）を知る必要がある。エネルギー轉換率は爆発地点の地層と地質、そして核爆発装置が設置された場所の地下ドームの大きさや形状に依存する。すなわち、爆発が空洞のドームの中で行われたのか、あるいは爆発装置の周辺が完全に埋め戻された状態で行われたのかで結果が大きく異なる。今回の核爆発実験の評価は、エネルギー轉換率の推定が鍵となる。

1. 核爆発は確かに起きた

核爆発があったことは「北朝鮮周辺空域で米国が採取した資料から核爆発で生成された放射性物質が検出され、韓国が国内で採取した大気から放射性希ガス、キセノン（Xe）が検出された」と報道された事実から明らかであり、疑う余地は無い。（資料 -2 放射性核種について）

何故に日本国内の関係機関が展開した全国各地の放射能観測、そして CTBTO 暫定事務局が整備を進めている放射性核種監視観測所等で検出することが出来なかったのか？

原因は種々考えられるが、主な理由を列挙すると以下のようなになる。

核爆実験の地下への封じ込めに成功し、粒子状放射性物質は放出されず、わずかに放射性希ガス (Xe) のみが地表に浸み出した。したがって、

CTBTO 暫定事務局が整備を進めている放射性核種監視観測所、および日本の関連機関の資料の採取は粒子状放射性物質が対象であり、希ガスは採取の対象としていない。

空間線量率で異常を測定できるほど大気は汚染されていなかった (検出限界以下)。

さらに、留意すべき点は、爆心地近傍から放出される放射性物質の拡散と大気の流れである。有効な放射能監視を行うためには気団の動きを追い、重点的な監視体制をとる必要がある。今回の核爆発実験で放出された放射性物質 (希ガス) を含む気団は、気圧配置と風向の変化から推測すると沿海州沿いに北上し、進路を北東に変え、北海道周辺の上空を通過したものと考えられる。

2. 爆発の規模は過小評価 (資料 -2)

観測された地震の規模 (m_b) は 3.9 ~ 4.2 であるが、実験場の地層と地質によって爆発エネルギーが地震波エネルギーに変わる転換率は大きく変わる (資料 -2. 3)、表 - 2)。今回の実験が行われた地層・地質に関する報告は無い。しかし、花崗岩のような硬質岩盤のなかで実験が行われたと見るよりは、玄武岩層があるいは凝灰岩層で行われたと見るのが妥当であると思われる。

そして、核爆発装置を設置したトンネルにつながる地下ドーム内の空間が完全に埋め戻され、周囲の地層と同等の固さにまで押し固められたとは思えない。大きな容積を持つ空洞の中で爆発実験を行うと、地震エネルギーへの転換効率は下がる (資料 -2. 5)。

北朝鮮が意図的に核爆発の規模を小さく見せるために空洞を残したとは思わないが、核爆発装置の搬入と据付、そして最終確認作業に支障が無い広さのドームで爆発実験を行ったとすれば地震の規模も小さくなる。

これらは全て、観測された地震の規模を小さくする要因である。大胆な仮定をすることになるが、核爆発実験が玄武岩層があるいは凝灰岩層の中で行われ、爆発は半径 7m の空洞と同程度の影響を及ぼす地下ドームで行われたとする。

この仮定の下で観測された地震の規模 (m_b) = 4.1 にかかる補正量は以下ようになる。

| | | |
|----------------|-------------|-------|
| 地層・地質にかかる補正 | +0.3 ~ +0.5 | m_b |
| 空洞内での核爆発にかかる補正 | +0.1 ~ +0.6 | m_b |

この補正を加えると地震の規模 (m_b) は 4.5 ~ 5.2 になり、爆発の規模は 1.2kt ~ 10kt となる。この推定範囲は予告値の 1/3 ~ 2.5 倍に相当し、許容される誤差範囲内と思われる。

3. 爆発規模の設計精度 (資料 -3)

核爆発実験の成否を判断するには、設計値 4kt とその誤差も考慮しなければならない。設計段階で核爆発の規模を決める主要なパラメータは、爆縮により到達を目指す超臨界状態の即発中性子増倍率 (k_p)、中性子源の挿入時刻と放出される中性子数、そして超臨界状態での連鎖反応持続時間である。ここでは設計精度に及ぼす主要パラメータの爆発規模に及ぼす影響を示しておく。

爆縮が設計通り進まず、即発中性子増倍率 (k_p) が目標値より 1% 小さい状態で連鎖反応を開始すると爆発の規模は約 1/2 になる。

連鎖反応を続ける超臨界状態の継続が 10nsec 短くなれば、核爆発の規模は 1/2 になる。

(10nsec は 1 億分の 1 秒に当たり、光が 3m 進むのにかかる時間に相当する)

中性子源が設計通り動作しなかった場合に予想される爆発規模の減少。

- ・ 中性子源からの中性子の放出が、最適な爆縮状態 (Pu が最大密度達成直前) から 10nsec 遅れれば核爆発の規模は設計値の 1/2 になる。
- ・ 最初の 10nsec の間に注入される中性子の数が設計値より少なく、1/2 になれば爆発規模は 1/2 になる。

このように、予定外の 10nsec の狂いが爆発規模を 1/2 にするパラメータが多々ある。そして、複数のパラメータの制御に狂いが生じ、予定していた爆発規模が数分の 1 になることはよくあることである。

4. 核爆発実験は及第点

核爆発実験の目的が爆縮技術を習得し、計画した爆発規模の爆発をさせることにあったとすれば、実験は成功したと見るべきであろう。しかし、上記の「2. 爆発の規模は過小評価」で述べたように、予告値 4kt と比較した核爆発実験の規模は多くの仮定の下に推定した値であり、真実は実験当事者の行う爆心点を取り巻く空洞壁で、放射化された核物質の量を測定する、という核爆発規模の確定作業の結果を待たなければならない。

他方、「3. 爆発規模の設計精度」で指摘したように、設計段階において爆発規模を決定するには高度な計算と工作技術に支えられた爆発装置の組み立て、そして爆発工程の高度な時間制御が必要になる。核爆発は 1 億分の 1 秒 (10nsec) を単位として動いている世界であり、反応時間の予測が 10nsec 狂えば爆発規模が 1/2 となるパラメータが多々ある。たとえ、実験結果が予告値 4kt から数倍違っていても、実験の失敗とは言えない。

北朝鮮は核爆発の制御で最も難しいハードルを越えた。この意味で核爆発実験は成功し、及第点 (70 点) を取ったと見ることができる。

なお、平成 18 年 10 月 27 日、日本政府は「我が国がこれまで収集した情報とその分析並びに米国や韓国分析等を我が国独自で慎重に検討・分析した結果、北朝鮮が核実験を行った蓋然性が極めて高いものと判断するに至った。」と核爆発実験に関する政府見解を発表した。

北朝鮮の核爆発実験に関する資料等

- 報道された観測データとその分析 -

. 事前通告

10月4日北朝鮮は対外向け臨時ニュースで「核爆発実験を行うことになる」と声明を発表。

10月9日北朝鮮は「核爆発実験（爆発規模 4kt）を行う」と中国に事前通報。

. 観測結果

-1 地震波について

CTBTO 暫定事務局の発表

10月9日10時35分ごろ、北朝鮮において人工的な爆発により誘起された地震が発生した。

| | | |
|-----------------|---|------------------------------|
| 地震の発生日時 | : | 2006年10月9日 01:35:27:58 (UTC) |
| 震源の位置 | : | 東経 129.0189度、北緯 41.3119度 |
| 地震の規模 (m_b) | : | 4.1±0.1 (注-1) |
| 地震波検知点数 | : | 22ヶ所 |

CTBTO 暫定事務局の他、地震の規模を発表した主な所は韓国地質資源研究院、米国地質学調査所 (USGS : US Geological Survey)、そして日本気象庁である。

表 - 1 観測された地震の規模 と核爆発の規模 (注-2)

| | 地震の規模 (m_b) | 爆発規模 (kt) | 発表日 |
|-------------|-----------------|-----------|-----|
| 韓国地質資源研究院 | 3.9 | 0.18 | 10日 |
| CTBTO 暫定事務局 | 4.1 | 0.34 | 13日 |
| USGS | 4.2 | 0.46 | 9日 |
| 日本気象庁 | 4.9 (注) | 3.98 | 9日 |

(注) 日本気象庁の地震の規模の計算は、国の防災目的のために定めたパラメータを用いて求めたものであり、

CTBTO 暫定事務局あるいは USGS が用いている核爆発実験探知用のパラメータとは異なる。

-2 放射性核種について

- ・ 米国国家情報局は10月16日「北朝鮮の周辺空域で10月11日に収集したサンプルから核爆発実験により生成した放射性物質 “ Radioactive Debris ” を検出した」と発表した。(注-3) (ODNI (Office of the Director of National Intelligence) News Release No. 19-16, October 16, 2006)
- ・ 韓国科学技術省は10月25日、国内で採取した大気から「核実験に関連する放射性物質キセノン (Xe)」を検出したと発表した。(10月26日 朝日新聞 朝刊)

- ・ 日本政府は放射能対策連絡会議代表幹事会の申し合わせに基づき、関係機関が全国各地で放射能観測を続けた。また、整備を進めている CTBTO 暫定事務局の放射性核種観測所も監視を続けているが、いずれも異常値を検出していない。北朝鮮周辺空域で粒子状放射性核種の収集を試みた英国から、核爆発で生じた放射性物質を検知したとの報告はない。(注-4)

-3 地勢の変化について

- ・ 米国の研究機関 (ISIS) は 9 月 17 日及び 10 月 13 日に撮影した実験場周辺の衛星写真を公開した。両衛星写真によると実験場近傍に地勢に顕著な変化は見られない。
(<http://www.isis-online.org/>)

・ 観測結果の分析

-1. 核爆発は起きた

- 1) 米国は北朝鮮の周辺空域で 10 月 11 日に収集したサンプルから核爆発実験により生成した放射性物質 “Radioactive Debris” を検出し、韓国科学技術省は韓国領土内で採取した大気から放射性キセノンを検出した。
- 2) 観測された地震波形は爆発事象により誘起された波形の特徴を顕著に示しており、地震の規模 (m_b) から推定される爆発規模は 0.2kt ~ 0.5kt である。(注-2)

-2. 爆発により誘起された地震の規模 (m_b) が小さくなる可能性が高い

- 3) 爆心地の地層により地震の規模は変わる。

地下核爆発実験の封じ込めに成功した場合、花崗岩のような硬質岩盤の中で起こした爆発による地震の規模を $m_b = 5.0$ と仮定し、観測地点の地震の揺れ幅 (振幅) を 100 と仮定すると、岩塩層、凝灰岩層、沖積層、そして乾いた沖積層で同じ規模の爆発を起こした場合、誘起する地震の規模と揺れ幅は表 - 2 のようになる。

表 - 2 爆発地点の地層のエネルギー転換効率による地震の規模の違い

| 地 層 | 地震の規模 (m_b) | 地震の揺れ幅(注) |
|---------|-----------------|-----------|
| 花崗岩層 | 5.0 | 100 |
| 岩 塩 層 | 4.9 | 80 |
| 凝灰岩層 | 4.5 | 30 |
| 沖 積 層 | 4.3 | 20 |
| 乾燥した沖積層 | 4.0 | 10 |

(注) 花崗岩層で起こした爆発による地震の揺れ (振幅) を 100 と仮定した場合の相対値

(B.A.ポルト著、小林芳正監修『地下核実験探知』古今書院、62 頁。右資料の地震効率より計算した)

4) 地震波の伝播経路における減衰率の違いによりマグニチュードは変わる。

米国のネバタ核実験場の地下に地震波の減衰が大きい特異地帯がある。そのため、ネバタで行った地下爆発実験の誘起した地震のマグニチュードには約 0.5 を加え補正しなければならない。4kt の核爆発実験をセミパラチンスクで行い、地球上の各地に分散配備されている遠隔地地震観測所で観測すると地震の規模マグニチュードの平均値は 4.9 となり、同じ規模の核爆発実験をネバタ行くと観測されたマグニチュードの平均値は 4.4 となる。

(Converting Seismic Magnitude to Explosion Yield, <http://earthscope.org/GEO399/MagToYield.html>)

5) 空洞の中で核爆発をさせると地震の規模は小さくなる。(Decoupling)

4kt の核爆発を半径 6.5m 以上の球形空洞の中で行った場合、地震の規模は小さくなり、半径が 10m になると地震の規模は約 1/30、40m になると約 1/70 になる。

(Seismic Verification of Nuclear Testing Treaty, OTA-ISC-361, PP 105-106, Partial Decoupling)

-3 . 計画した核爆発規模に到達しなかったとしてもその要因はわずか(注-5)

ここでは核爆発の基本となる設計パラメータを $k_p = 1.925$ 、最初の 10nsec間に注入される中性子数を 10 個、そして 10nsec毎に核分裂を起こし、超臨界状態は 0.8 μ sec 続き 80 回の核分裂を繰り返すと仮定すると、Puの総核分裂数は 5.9×10^{23} となり約 4ktの核爆発に相当する。(注-6)

(10nsec は 1 億分の 1 秒であり、光が 3m 進むに要する時間、1 μ sec は 1,000nsec)

6) 爆縮が設計値まで到達せず即発中性子増倍率 (k_p) が予定の値に到達しなかった場合に予想される爆発規模の減少。

設計値である $k_p = 1.925$ に対し、爆縮で k_p が 1.923 となれば爆発の規模はおおよそ 10%減少し、 k_p が設計値に 1%届かず 1.906 にしかならないと爆発の規模は約 1/2 になる。

7) 超臨界状態の継続が 10nsec 短くなれば核爆発の規模は約 1/2 になる。

8) 中性子源が設計通り動作しなかった場合に予想される爆発規模の減少。

中性子源からの中性子の放出が、最適な爆縮状態 (Pu が最大密度達成直前) から 10nsec 遅れれば核爆発の規模は設計値の約 1/2 になる。また中性子の発生量が設計値より少なく、1/2 になれば爆発規模も 1/2 になる

主な参考資料

Nuclear Weapons Frequently Asked Questions

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq0.html>

小山謹二「包括的核実験禁止条約 (CTBT) と検証制度について (1) および (2) 」

http://www.ijjnet.or.jp/JIIA-CPDNP/pdf/CTBT_koyama

<http://www.ijjnet.or.jp/JIIA-CPDNP/pdf/CTBT-2-PTBT.pdf>

注-1：地震の規模はMagnitude (m_b)で示され、震源から 100kmの地点の地震波の振幅の常用対数として表している。そして、振幅（揺れの大きさ）が 10 倍になると m_b は 1.0 だけ加算される。

注-2）表 - 1 に示した核爆発の規模は観測された地震の規模から計算している。核爆発はセミパラチンスクで行われた地下核爆発実験と同じ状況の下で行われたと仮定し、核爆発装置周辺に余計な空間が無い様に埋め戻され、付き固められていると想定している。核爆発の規模の計算は式 $m_b = 4.45 + 0.75 * \log(Y)$ (Y の単位はkt) により行った。

注-3）米空軍は大気中に拡散した放射性物質の収集を目的とする専用機「WC-135」を用い、北朝鮮周辺の上空でサンプルの収集を続けていた。収集するサンプルには大気中に放出され浮遊している粒子状放射性核種のみならず、放射性希ガスの収集を目的とした多量の空気（高圧に圧縮し耐圧容器に捕集）がある。なお、WC-135 は 1963 年に発効した PTBT（部分的核実験禁止条約）の履行と遵守を目的とし、核爆発実験により大気中に放出される放射性核種の量を監視するために備えられた専用機である。（Wikipedia, WC-135 Constant Phoenix）

注-4）10月9日、北朝鮮の地下核爆発実験実施の発表を受け、日本政府は同日付の放射能対策連絡会議代表幹事会の申し合わせに基づいて、関係機関は全国各地で一斉に放射能監視を開始した。関係機関には 47 都道府県、環境省、（財）日本分析センターが実施している空間放射線量率、航空自衛隊の航空機が採取した日本上空 3 空域の大気浮遊じんの放射線測定等である。（原子力産業新聞、2006 年 10 月 19 日）

CTBTO 暫定事務局が整備を進めている放射性核種観測所の内、北朝鮮周辺国で監視を続けている観測所は、日本の高崎、沖縄、そしてモンゴルのウランバートルである。

英国は空中給油機として使用されている「VC-10」を改造して集塵ポットを取り付け、急速 10 月 11 日、日本に送り込み、北朝鮮の周辺空域で核爆発実験の証拠となる粒子状放射性核種の収集を試みた。

注-5）早期爆発（pre-detonation）を起こす可能性はない。

早期爆発の起きる確率は全 Pu に含まれる Pu-240 の量（含有率）によって決まるが、1990 年 IAEA が確認した北朝鮮の保有する Pu に含まれている Pu-240 は 2.5%以下であり Super grade に相当し、早期爆発が起きる可能性は少ない。

注-6）核爆発の規模は核分裂を起こしたPuの総数で決まる。そして、1ktの核爆発は 1.45×10^{23} 個のPu-239（57.8grのPu-239）が核分裂を起こした時に放出される総エネルギーに相当し、1,000 トンのTNT火薬が爆発したときに放出するエネルギーに等しい。