

JNMM2008 年春号部分和訳

(翻訳：岩永 雅之)

Fifty Years of INMM

計量管理：その創成期

James E Lovett

INMM 会長 1971-1972

1946年、第二次大戦の余波の中、米国議会はただちに1946年原子力エネルギー法を策定した。この法律は、マンハッタン計画の技術者部隊の後継組織である原子力委員会（AEC）に対し、核兵器およびそれに必要な核物質の生産量につき毎年、アメリカ合衆国大統領の認可を得るよう課したものであった。（実際上は、AECが生産能力の見積りを準備し、大統領はそのレベルに応じた生産を認可した。）生産は実際上、政府契約の事業者が運転する政府所有の施設（GOCO：Government-Owned Contractor-Operated）で行われたので、この法律により、すべての核物質（原料あるいは製品）は、米国政府の所有となった。

1949年、Lybrand, Ross Brothers, and Montgomery 公認会計事務所は、契約者は、毎月、物質収支勘定を提出すべきとし、この中で、まず一方で、期首在庫及び他施設から生産され受入れた核物質すなわち（入量）計上核物質、を、また、他方で、期末在庫、他施設への払出し、および核的損耗、その他の認知された損失すなわち不明物質（MUF）を示すべきことを報告した。Lybrand は、AEC はこれらの2つの数値を比較し、大きい差異については、これを糾すことを勧告した。

以後、何年にもわたり様々に言及されているように、このようにして、計量管理、(データ)管理、核物質（測定）管理、保障措置の科学的取り組みの分野が誕生した。余談になるが、Lybrand は“MUF”なる語（一般的に、“muff”（ヘマ）と発音する）の創造者ではない、AEC が自らの用語として造ったもので、今日、米国では一般的には用いられない。

ここで、GOCO 施設で彼ら運転者に任せられた核物質について職務忠実性（stewardship）が適切に維持されているか AEC がどう確かめるのか、との Lybrand に対する問いかけがあったことは重要で注目に値する。この問いは AEC の生産事業部部局である Source and Fissionable Materials Accountability Branch（核原料・核燃料会計課）から出されたものである。課であれ部局であれ、盗取やテロから守ることについては何ら正式な責任はなかった。物理的・人的安全保護システムは、存在したが、別々に管理されていた。テロリズムは当時の主流の用語範囲にはなかった。Lybrand に提起されたように、この問いは、品薄で生産コストが高く、かつ、米国軍事政策上、計り知れない価値を持つこの物質に対する職務忠実性についてのものであった。

この問いが会計責任を主に持つグループによって提起され、Lybrand が監査会社との意識をもっているとするれば、Lybrand の答えが当然予想される場所であった。しかしながら、そこには、当時も、また現在にいたるまでも数々の主要な問題が横たわっていた。その第一の難問は、物質収支には精確な測定が要求され、それは、一般的に適用可能な合理的精度の測定法が使われる原料や製品の量にとどまらず、在庫量、具体的にはスクラップや廃棄物に対しても必要だということで、これは、その当時、その後数年、さらにはある程度は今日にもわたる問題でもある。非破壊測定法は、まだ2-30年間先の話で、非均質のスクラップ物質の“秤量、サンプル採取、分析”は、殆ど役に立たなかった（この分野で従事していた人達は、たいがい、それが実際上いかに役に立たないかを認めようとはしなかったが）。原則的には、非均質のスクラップは、サンプル採取前に均質化するか、複数サンプル採取することになっていたが、広い意味からは、目的は計量会計ではなく、生産であった。

契約者は、核物質管理のために、どのくらいの努力（お金）を払うべきかを問い、これに対し核物質は、“その戦略的、財産的価値に対し妥当に管理する”という紋切り型で現実には

定量化できないような答えで指示された。濃縮ウランあるいはプルトニウムの財産的価値は、単位当りの製造コストから見積もられた。しかし「戦略的価値」と「妥当に管理」の概念はそれほど容易には定義されなかった。

例えば、財産的価値 1000 万ドルで戦略的価値 1000 万ドルのウランかプルトニウムがあれば、どのくらいのお金を核物質管理に使うべきか?どんな実用的な答えも今まで示された事はない。文献上では、頭文字をとった FORCE (Formula for Optimizing the Ratio of Cost and Effectiveness; コスト/効果率の最適化公式) に一つの答えが埋まっている。理論上は、この発想では、動機因子は MUF の大きさではなく、それを取り巻く不確かさということになる。しかしながら、実際の計算は簡単ではなく、結果の解釈はさらに不鮮明であった。筆者はたぶんその分野においてまだそれを覚えている唯一の者であろう。

初期の GOCO 契約者が直面していた 2 番目の問題は、しばしば工学よりはむしろ経理経験者である AEC 検査官に、それほどの価値物質とは扱っていない工程技師が完全に妥当と考えた在庫差を受け入れさせるのに苦労したということである。AEC は、どれくらいの差異なら妥当であると認めるのか? 技術者が、1 つの論を張れば、AEC 監査者は別の論を張った。何らかのフォームによる客観的な統計学的評価を使用すべきだとの合意を受けて、1950 年代半ばに、統計専門家パネルが、今日、一般化、義務化されている統計的なツールである誤差伝播を推奨した。

核物質収支会計の代替手段を示すのは困難である。当時、貴重な物質を扱う他産業のレビューで、いかなる定常的実在庫測定をも実際に試みられたことはないことが示される一方で、歴史は帳簿在庫を信用すると重大な結果を招くとの事例に溢れていた。AEC が、核物質の生産、損失、および施設間移動を測定し、記録することが必要なのは明確であった。また、実在庫の定期的測定を要することも明確であった。より最近では、さまざまな管理手段が核物質会計に折り重なっているが、物質収支勘定は現在の核物質管理システムの基礎として残っている。

また、誤差伝播の代替手段を提案することも困難である。いくつかの代替策が当時、提案されたが、なんら注目に値する後続のものとはならなかった。ごく最近、NRTA が代替手段として相当に深く探求された。いかに代わりが魅力的な特徴を持っていようと、それらには皆、2 つの大きな問題がある。1 つは、それらは殆ど施設固有のものあるということである。NRTA は再処理に関し研究されたが、他のタイプの施設にそれを適合させるかどうか研究されたことはなく、また直観的には明白でない。もう 1 つの問題は、一つの (収支) 期間が初期の (収支) 期間と比較できるよう安定した運転状態、期間を仮定していることである。これは、工程ラインを持つ施設では有効であったかもしれないが、研究施設では一度も機会が無かった。

しかしながら、誤差伝播はそれ自体に問題を持ち込んだ。計算には、測定不確かさのすべてのソースを識別し、定量化することが必要である。理論の進展とともに、長期系統誤差、短期系統誤差、偶然誤差の 3 つのクラスが分類識別された。濃縮ウランの古典的測定には、バルク重量あるいは容量、化学分析、そして同位体分析が含まれる。そのうえ、化学分析、同位体測定の両方ともサンプルの分析がベースになるためサンプリング誤差の 2 つのソースがあることになる。全部で、各測定はおおよそ 15 の測定不確かさのコンポーネントに関係することになる。

その結果、核物質管理システムを扱った読者であれば分かるように、測定の不確かさを決定し管理するプログラムは測定に係る予算の半分を必要とする事になる。(そんなことが) 必要か? 必要である; 施設が物質収支を準備し、誤差伝播によりそれら収支の不確かさを算定するとの受入要件に照らし。(これは) 直感的には、決して明白ではなからう。それに必要な金額は、あるいは少なくともかなりの金額は、単にそのための文書作成よりは、むしろ測定品質を改良するのに費やされるほうがよいであろう。

そして、最終的には、少なくとも著者の意見では、誤差伝播はずさんな物質収支会計を知らず知らずのうちに正当化することとなった。計算した物質収支の不確かさの範囲内に観測された MUF/在庫差 (ID) があれば、施設運転者は、悠々としてしまった。調査? 調査することが何かあるか? 主観的な感覚で、いかに疑わしいと見えても、観測された MUF/ID は測定の偶然誤差と系統誤差の偶然の組み合わせの結果であると数学的に決められてしまっている。

調査は時間のむだとされるであろう。たとえば、観測された差異が 40 ∇ 100 であるなら、良。観測された差異が 95 ∇ 100 であるなら、95 は測定誤差と帳簿外の損失の両方を含んでいることもありえる。しかし、統計的にはしきい値に達していないので、ほとんどの施設は、その物質収支期間の帳簿を閉じ、次に移ってしまった。より最近になり、米国原子力規制委員会規則で、物質収支の結合された不確かさに上限を指定したが、それが形作られる数年間は、施設運転者は、MUF/ID が推定される不確かさの範囲にある限り心配することはないと、あからさまではないにしろ、言われていた。

この推論の問題は、MUF/ID が計算された不確かさによって説明され得なければ、それは測定誤差の構造が適切に記録されていないに違いないとする不幸な哲学であった。見落としていた損失を探すな！見落としている測定誤差の要因を探せ！歴史的には、これが実情であった。しかしながら、疑問は、もし結果が有用でもなく信ずるに値しないなら、なぜ、複雑な統計的検定法を走らせ煩わせるのか、である。

1955 年に、米国議会は原子力エネルギー法を完全に書き改めた。GOCO 施設は残り、濃縮ウランとプルトニウムの高い戦略的価値から主要なユーザとして残っていたが、ユーザのいくつかの新しいカテゴリが現れた。

計量管理の創成期の、重要なカテゴリは AEC 定価契約者であった。これらは、さまざまな実験用原子炉施設を建設し、それら原子炉用燃料を製造し、また増加する海軍艦隊の核施設燃料を製造した会社であった。初期には、定価契約者は、施設を自前で所有し運転するのが典型的で、スクラップと廃棄物を集積する責任はあったが、それらを回収する責任は無く、財政上は、契約規定値（たいがい 2 パーセント）を超えると廃棄あるいは損失に対し責任があった。

今や、問題は職務忠実性ではなく、それは損失に関わる財務会計責任となった。定価契約者は、今でもそうであるが、半期か年一度の間隔で物質収支を準備しなければならなくなった。誤差伝播は必要でなく、また殆ど行う事はなく、事実、ほとんどの定価契約者には、基本となる移転に伴う測定固有の不確かさについての文書了解は全くなかった。

関心問題は、契約者を強制している「実際の損失を許容値内に抑えるか、あるいは過剰損失対価を AEC へ返還する」ということにしかなかった。スクラップは、後になるまで回収されず、次に、他者が処理し、さらに、いくつかの重要な測定問題が残ったままであったことから、損失責任を割り当てるのは困難であった。実際の損失は、時には、2 パーセントあるいは許容値がいくらであれ、それを超えて出現したが、ごくわずかな契約者を除き、今まで、過剰損失対価を払ったことはない。

1966 年、定価契約者からの大きな損失報告が増加し、いくつかの GOCO 施設で大きな MUF/ID が揺動したことに当惑した AEC は、物質収支会計に関する基本的な問題について討議する招待特定会合を後援した。その 1 つの結果が、非破壊測定法開発の主要プログラムの AEC 助成であった。それは時間がかかったが、今日、非破壊的に適切な精度で測定できないスクラップあるいは廃棄物中核物質を定義するのは難しいであろう。今日、物質収支は、創成期よりはるかに良い形になっている。

物質収支会計と誤差伝播には、成功と失敗があった。

- はじめの頃、ウラン鉱業者はトラックにいくらか鉱石を残したまま AEC ウラン工場を出るところを見つけられた。AEC の検査官は、ウラン鉱石備蓄を在庫調査し実在庫が帳簿在庫に及ばないと結論したが、彼らのデータを信用せず、不足を報告しなかった。
- ロスアラモス国立研究所 (LANL) 地表埋設サイトでは、物質収支会計で損失を検出し、埋設物にうっかり含まれていた少量のプルトニウムを回収するためサイトは掘り返された。1960 年代初期、中国が、保有しているとは知られていなかった濃縮ウランを用いて核実験を行った際、物質収支会計によりこのウランは 100% の信頼度レベルで、米国起源ではないと集約できた。
- 説明不能の在庫量不足がプロセス技術者を動かし思いがけない場所にある核物質を見つける事例が幾つもあった。
- 1960 年代後半には、Nuclear Materials and Equipment Corporation (NUMEC 社) が秘密裡に濃縮ウランをイスラエルに出荷したという強い疑念が、少なくとも一部には、あった。後に、

これは本当ではないと明白に確証されたが、当時の NUMEC の核物質管理実績が貧弱であったために、計量記録からこの結論を得ることは不可能であった。

- ・核物質管理法令（の認可）を受けると同時に、同 NUMEC 社は、およそ 2,600 キログラムのプルトニウム金属を ZPPR 板状燃料に加工し、完成品として 2,300 キログラムを納入し、残りの大部分を硝酸プルトニウム溶液として回収し返還した。最終的な契約上の MUF は 8kgPu となったが、低レベル廃棄物の回収を引き受けた LANL は後になって、およそ 8kgPu が返還廃棄物中にあったと報告し、NUMEC は、これを過小評価していたことが明らかになった。

物質収支会計の歴史は、およそ 60 年にわたる。その草創期は、最も重要なものであった。残念ながら、その後、理論的理由および実際的理由の双方からその期待に沿った行動をとることは出来なかった。今日では、物質収支会計は職務忠実性から提起された当初の問いに答えうるであろうが、世界は動いている。今日の問いは、盗取防止、あるいは回復可能な短時間内での最小検知が主たるものとなった。今日では、物理的、人的セキュリティ手段がパレットの強調色となり、物質収支会計は相対的に小さな役割とされている。それにもかかわらず、様々なセキュリティシステムが機能しているとの保証を与える他の理由が無い限り、原子力産業は依然として物質収支会計を必要としている。

備考；

この論文は、*Material Accountancy* の起源、変遷、様々な課題局面など、歴史的経緯を追想したものであることから、著者の趣意を思料し、仮訳にあたっては、今日、一般的に用いられる「計量管理」的用語を避け、時代局面に合わせた邦訳用語を独断的に用いている。例) *Material Balance Accountancy* : 物質収支会計 など