



事故時線量に関する補足的検討

A Study on Dose Control for Tokaimura Criticality Accident Termination

金盛 正至 須藤 俊幸 田中 憲一 高田 純

Masashi KANAMORI, Toshiyuki SUTO, Kenichi TANAKA and Jun TAKADA

原子力緊急時支援・研修センター

Nuclear Emergency Assistance and Training Center

January 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

事故時線量に関する補足的検討

日本原子力研究開発機構
原子力緊急時支援・研修センター
金盛 正至、須藤 俊幸⁺
田中 憲一^{*}、高田 純^{*}

(2010年11月12日受理)

東海村臨界事故は、原子力の緊急事態に関する対応を検討する貴重な材料と考えられる。これまでに実施した、線量評価及び管理法に関する考察である JAEA-Technology 2009-043 「臨界事故終息作業時の線量管理方法の考察」では、臨界事故終息作業時の線量管理方法について考察を行った（以下「既報」という）。その結果、40m 程度から 100m 程度までの近距離の測定結果を基礎に、線量の再評価を行い、個人線量と比較し 60～80%程度の精度で一致することについて述べた。本報では、線源から 100m 程度までの距離と、それから遠方の距離における放射線の減衰について、方対数／両対数プロットの妥当性、及びプロット点数の影響について検討した。

その結果、中性子線の高い線量場における作業の、線量評価等のための線量の目安について、①作業者の年間線量限度、②作業者の当該作業以外の線量、③測定誤差、の三点を考慮し、年間 20mSv の 2 分の 1 の 10mSv 程度とすることにより、安全裕度をもって作業できることを確認するとともに、実際の線量管理を行う上での、両対数の利用できる範囲、測定点の数の持つ意味合いについて取りまとめた。

原子力緊急時支援・研修センター：〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601 番地 13

+: 次世代原子力システム研究開発部門 再処理設計・技術実証ユニット

*: 札幌医科大学 医学研究科

A Study on Dose Control for Tokaimura Criticality Accident Termination

Masashi KANAMORI, Toshiyuki SUTO⁺, Kenichi TANAKA* and Jun TAKADA*

Nuclear Emergency Assistance and Training Center
Japan Atomic Energy Agency
Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received November 12, 2010)

Tokaimura criticality accident is considered a precious material for nuclear emergency response study. Conducted so far, the study on dose assessment and management methods JAEA-Technology 2009-043 "A Study on Dose Evaluation for Tokaimura Criticality Accident Termination", the dose we discuss how to manage termination of the criticality accident at work or (we refer as previously report) As a result, based on the measurements from around 40m to 100m, we made a re-evaluation of the dose. Reevaluated doses match with the degree of accuracy 60% to 80% compared with the respective individual dose. In this paper, we validate by these doses by using log- log plots and semi-log plots for the distance from the source approximately 100m and further attenuation.

As a result, if the field is under high doses of neutrons, dose constraint assessment should consider following three points,

1. The annual dose limit for workers
2. Dose received other than the same work
3. Measurement error

By considering three points, by using 10mSv, half of the annual limit 20mSv, as dose reference, the work performed could safely be managed. And summaries the valid range of log-log plots for intense neutron dose estimation.

Keywords: Radiation, Exposure, Disaster, Accident, Criticality, JCO

⁺: Reprocessing Plant Design & Demonstration Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
^{*}: School of Medical, Sapporo Medical University

目 次

1. はじめに.....	1
2. 臨界事故終息作業と線量再評価の概要.....	1
2.1 第一回目のポラロイド撮影と評価.....	1
2.2 個人線量の再構築について.....	2
3. 線源から 100m 程度の距離における線量の推定方法の考察.....	3
3.1 方対数／両対数プロットの妥当性.....	3
3.2 プロット点数及び測定データの影響.....	5
3.3 線量管理における作業計画とその見直しの重要性.....	7
4. 防災業務関係者の被ばく線量について.....	8
5. まとめ.....	9
5.1 作業計画時における線量及び測定法の考え方.....	9
5.2 測定点数と両対数プロットを使用する範囲の検討.....	9
5.3 線量限度について.....	10
参考文献.....	11

Contents

1. Introduction.....	1
2. Overview of the criticality termination and dose estimation.....	1
2.1 Dose estimation on the first photography.....	1
2.2 Reconstruction of personal doses.....	2
3. Study on the dose estimation for around 100m from the source.....	3
3.1 Propriety of plotting on semi-log and log-log graph.....	3
3.2 Effects of the numbers of plotting and measured data.....	5
3.3 Importance of reconsideration of the work plan.....	7
4. Dose of the person who engaged in emergency work.....	8
5. Summary.....	9
5.1 Dose measurement method for the planning phase.....	9
5.2 Study of the range using a log-log plot and number of measurement points.....	9
5.3 Dose limit.....	10
Reference.....	11

This is a blank page.

1. はじめに

本年度(平成 22 年度)は、我が国で初めて国による実動を伴う国民保護訓練が茨城県で実施される。東海村臨界事故は、原子力の緊急事態に関する対応を検討する貴重な材料と考えられる。既報では、臨界事故終息作業時の線量管理方法について考察を行った。1999 年の東海村臨界事故時の線量管理の結果から、今後の緊急時作業に有益な教訓を引き出すためである。

その中で、臨界事故時の作業前に中性子線とガンマ線の測定結果から予測した作業員の個人線量は、実際の線量と比較し約 50~90 倍程度低かった事実に関して、既報で、事前評価が低くなった原因を探り、作業員の個人線量の再評価を行うとともに、同様な臨界事故の場合の、事故終息作業における望ましい線量管理方法を検討した。本報では、線量評価に関するその後の検討内容として、線源から 100m 程度までの距離と、それから遠方の距離における放射線の減衰について、方対数/両対数プロットの妥当性及びプロット点数の影響について検討した。また、ICRP の最近の勧告等視野に入れつつ、緊急時に適用されるべき線量管理方法について検討した。

2. 臨界事故終息作業と線量再評価の概要

本報告ではまず既報の、臨界事故の終息作業及び線量再評価の概要に加えて、その後の検討内容について述べる。

JCO 臨界事故は、1999 年 9 月 30 日 JCO 東海事業所の転換試験棟（以下、「転換棟」という。）において発生した。(文献 1,2,4,5,11 参照)

臨界事故終息作業は、JCO の作業員等により、加えて原子力安全委員会、国の専門家などの助言等を受け実施された^{1),5),11)}。終息作業は、各作業員の線量を限度内にするため、作業毎に分割し主に①ポラロイド写真撮影と準備作業、②水抜き作業、③ボロン水の注入の各段階で行われた。作業の線量管理としては、特に第一段階の、ポラロイド撮影における線量評価が、最も重要となる。その作業を行う範囲は沈殿槽（以下、「線源」という。）から 3~5m 程度と判断された。最終的に、臨界事故の総核分裂数は、 2×10^{18} と評価された^{1),2)}。

終息作業に当たる作業員の放射線防護は、作業前に中性子線とガンマ線の線量を測定し、その結果に基づき、限度内となるよう安全係数を考えつつ線量の管理を行った¹³⁾。

2.1 第一回目のポラロイド撮影と評価

中性子線及びガンマ線の測定は、転換棟から約 150m から約 40m 程度までの測定値を中心に評価した。中性子線、ガンマ線の測定に基づき、臨界事故時点の線量予測し安全係数 10 倍程度とり、第一回目の作業を行ったが、10 倍程度以上の安全裕度をとっているため、十分な安全裕度を持って 100 mSv を下回る作業管理が可能と判断したが、実際はより高線量であった。

第一班の作業員の線量管理は、結果的には作業開始後に約 1 分程度でアラームが鳴り、引き返してきた。マイドーズミニ（中性子線用）による測定値は一名が 111.9 mSv となった。もう一名の作業員は 91.2mSv となった⁵⁾。これらの線量は後の検討で、当時の法令による換算係数による、マイドーズの補正係数^{2),6)}が、1.85 となったことにより、この補正係数を使うと、第 1 班のマイドーズミニ（中性子線用）の指示値 111.9 mSv は、1.85 で除し 60.4 mSv となり、もう一名の指示値 91.2mSv は 1.85 で除し 49.3mSv となった^{2),6)}。

この第一班の線量測定結果に基づき、後続の作業員の線量管理は、二分の一程度に納まるよう作業時間を短くするなどして対応したため、作業計画の範囲で納まる線量管理が実施できた。

2.2 個人線量の再構築について

場の線量率の測定結果からの線量予測値と、第一班の個人線量測定結果、すなわち、実際の作業員の線量測定値として、①マイドーズミニによる個人の線量測定結果及び②ホールボディカウンタにより、各作業員を体外から測定した Na の放射化値から個人ごとに線量を計算評価した結果を、両対数プロットにより比較検討した。中性子線については、3 点の測定値を用いた評価を図 1 に示す。場の線量率測定結果からの線量予測値を中心の線、誤差の範囲を上下の線で示し、3m 地点の誤差の範囲を円で示すが、この範囲に個人線量測定結果は入っている。ガンマ線については、4 点の測定値を用いた評価を図 2 に示す。円で個人線量測定結果の範囲を示すが、上下の線で示す誤差の範囲の下端と重なっており、中性子線、ガンマ線ともに、線量予測結果の妥当性が確認された。

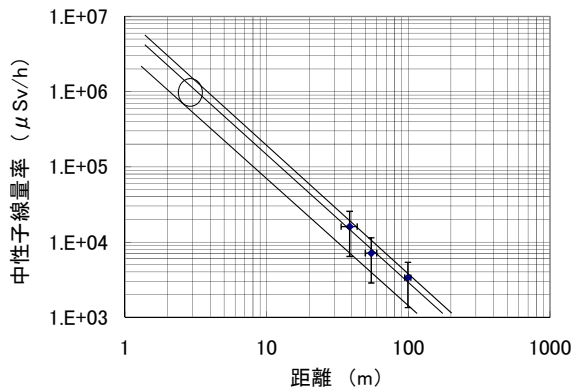


図 1 中性子線測定3点による線量再評価

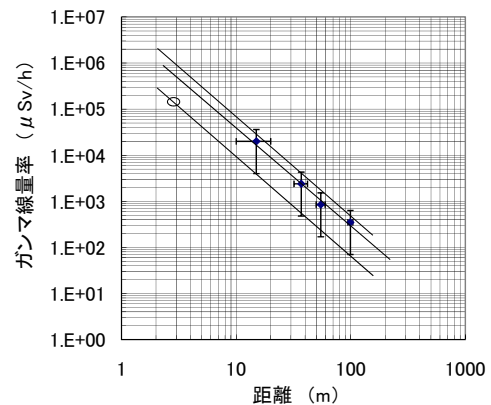


図 2 ガンマ線測定4点による線量再評価

まとめると、既報告では、以下の考察を行っている。

- ・ 臨界終息作業計画段階で作業地点の線量予測を行うために、約 40～150m の 5 点の線量測定値を取得し、方対数グラフでのプロットし、(これが非常によく直線に乗っていたことから)、作業場所の位置まで直線外挿することにより中性子線量率として 18mSv/h と予測したこと、
- ・ 作業後の測定データでは、中性子線量率は平均約 550mSv、最大約 1500mSv/h であり、当初の予測より数十倍大きかったこと、
- ・ 後に、上記の 5 点の事前測定値から作業地点近傍側の 3 点 (約 40～100m) (ただし、このうち再近傍の 1 点の測定値を別チームの追加測定で得られたものに置き換えたもの) を両対数グラフでプロットして直線外挿することにより、測定誤差等を考慮して 550～1500mSv/h と、ほぼ事後の測定値と一致する結果が得られることについて、報告した。

3. 線源から 100m 程度の距離における線量の推定方法の考察

その後の検討内容として、本報では、既報で評価できていなかった、臨界終息作業位置の線量率予測を行う際の、方対数／両対数プロットの妥当性及びプロット点数の影響について検討したものである。

3.1 方対数／両対数プロットの妥当性

図 3 は、参考文献 3) に示された、転換試験棟からの距離と線量率の測定データ及び空気による吸収・散乱と距離の逆 2 乗による減衰を考慮した式による近似曲線を示したものであり、近似曲線は実測データの傾向をよく表している。

図の線量率是对数目盛、距離は線形目盛とした方対数グラフで示されており、おおよそ 300m 以遠では直線に近く、それより近距離では直線からはずれ、左上りになってきている。

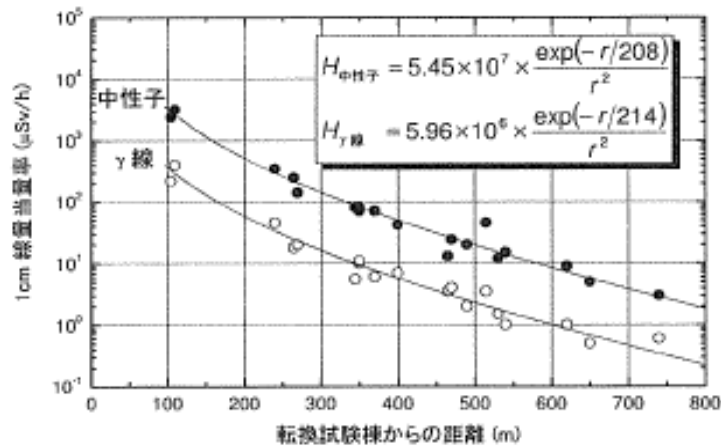


図 3 JCO 臨界事故定常状態時の距離－線量率関係³⁾
(9 月 30 日 12:45 測定データとフィッティング曲線)

この傾向を見やすくするため、図 3 の中性子線量率の近似曲線を両対数及び方対数グラフで示したものが図 4 である。両対数グラフでは約 100m 以内では直線に乗っており、方対数グラフでは約 100m 以遠で直線上に乗っている。

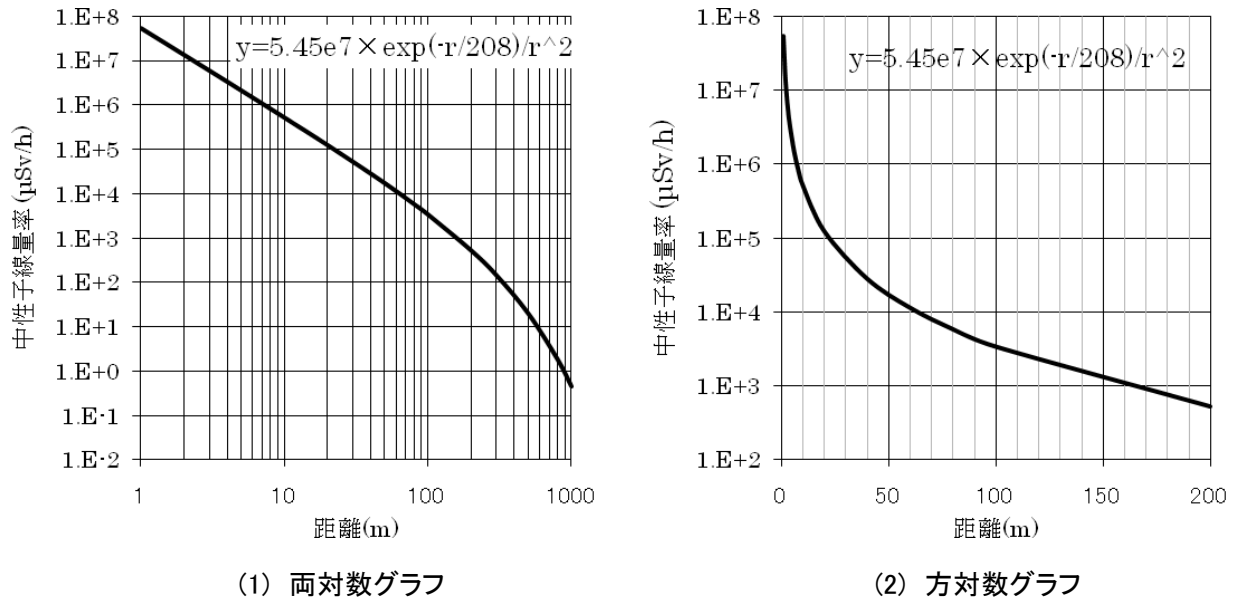


図4 距離—中性子線量率関係の両対数、方対数プロット

図5は、図4の近似曲線の ①距離の逆2乗による減衰項 ($1/r^2$) と、②空気による吸収・散乱による減衰項 ($\exp(-r/208)$) の寄与を対数値で示したものである。①の寄与がほとんどであり、200m地点 ($\log(r)=$ 約2.3)においても②の寄与は①の寄与に比べてわずかである。

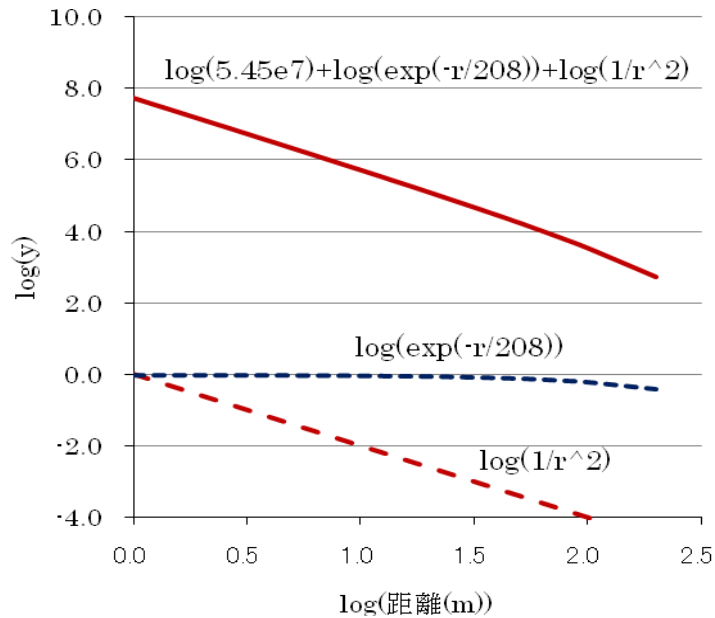


図5 近似曲線の各項の寄与

以上の状況から、線源近辺の線量率を比較的離れた（数 10m 以上）位置の線量率データから外挿する場合には、両対数プロットを行うべきであり、片対数プロットで外挿すると著しく過小評価になることが分かる。当然のことながら、線源に近い線量率データがあることが望ましい。また、図 4(1)から分かるように、100m 以遠の線量率データしかない場合には、両対数プロットで線源地点へ外挿するとオーダーで過大評価することになるので、100m 以内のデータが少なくとも 2 点あることが望ましい。

3.2 プロット点数及び測定データの影響

表 1 に臨界終息作業計画段階での中性子線量率測定データを示す。これらのデータは、測定のパラツキの影響を少なくするため、同一種類の測定器（サーベイメータ）を用いた同一測定チームの測定による測定データである。作業地点側最近傍の 38.5m 地点の測定値 10mSv/h はフルスケールを越える値を示していたものをフルスケール値としており、これより若干高かったものであったと推定される。追加測定値 16mSv/h は、別チームのレムカウンタによる測定値である。臨界終息作業計画段階では、同一種類の測定器を用いた同一測定チームの測定という条件を重視し 10mSv/h を採用している。

表 1 臨界終息作業計画段階での中性子線量率測定データ

距離(m)	中性子線量率 (mSv/h)
150	1.42
129	1.97
99.2	3.35
55	7.1
38.5	10 (初回測定値) 16 (追加測定値)

図 6 は、臨界終息作業計画段階で測定された線量データ 5 点、及びそのうちの近傍 3 点（初回測定データを用いた場合と追加測定データを用いた場合）を用いて、両対数、方対数プロットしてフィッティング直線を外挿した場合の図である。図は両対数で示しているの、方対数プロットした場合の線は曲線になっている。

図 6 に示したそれぞれのフィッティング式を用いて、3m 地点の線量率を計算したものを表 2 に示す。これより得られる知見を以下に記す。

- 両対数のフィッティング式を用いた場合、すなわち、両対数プロットで直線外挿した場合の 3m 地点の線量率は、当初測定データを用いた場合、約 200～約 400mSv/h、追加データを採用した場合、約 900～約 1100mSv/h となり、後者の方がより実測データ（平均 550mSv/h、最大 1500mSv/h）に近い値が得られる。
- また、より正確な測定データと考えられる追加測定値(16mSv/h)を採用した場合で、測定データを線源近傍側 3 点用いた場合と 5 点用いた場合の推定値の差は 20%程度であるが、線源最近傍データで初回測定を用いた場合と追加測定値を用いた場合の差は 3～4 倍程度もあり、線量推定の観点からは、プロットデータ数を線源近傍側の 3 点に絞り込むことよりも、より正確と考えられる値を用いることが重要であり、かつ、安全側の推定を行うという意味では、高い値の追加測定値を使う選択肢も重要であった。

- 一方、方対数の直線外挿では、極めて過小評価になっている。
 しかしながら、上記の初回測定値 10mSv/h データを用いた臨界終息作業計画段階で作成された方対数グラフのプロット (図7) は、偶然にも、これを採用することの正当性を示すかのごとく極めてよく直線に乗っていた (33.5m 地点にプロットがあるが、作業当時の距離の推定値である。その後の測定は、38.5m の値を採用している)。もし、追加測定値 (16mSv/h) をプロットしていたら (図7 中★で示す)、直線外挿に疑問を生じ得たかもしれない。

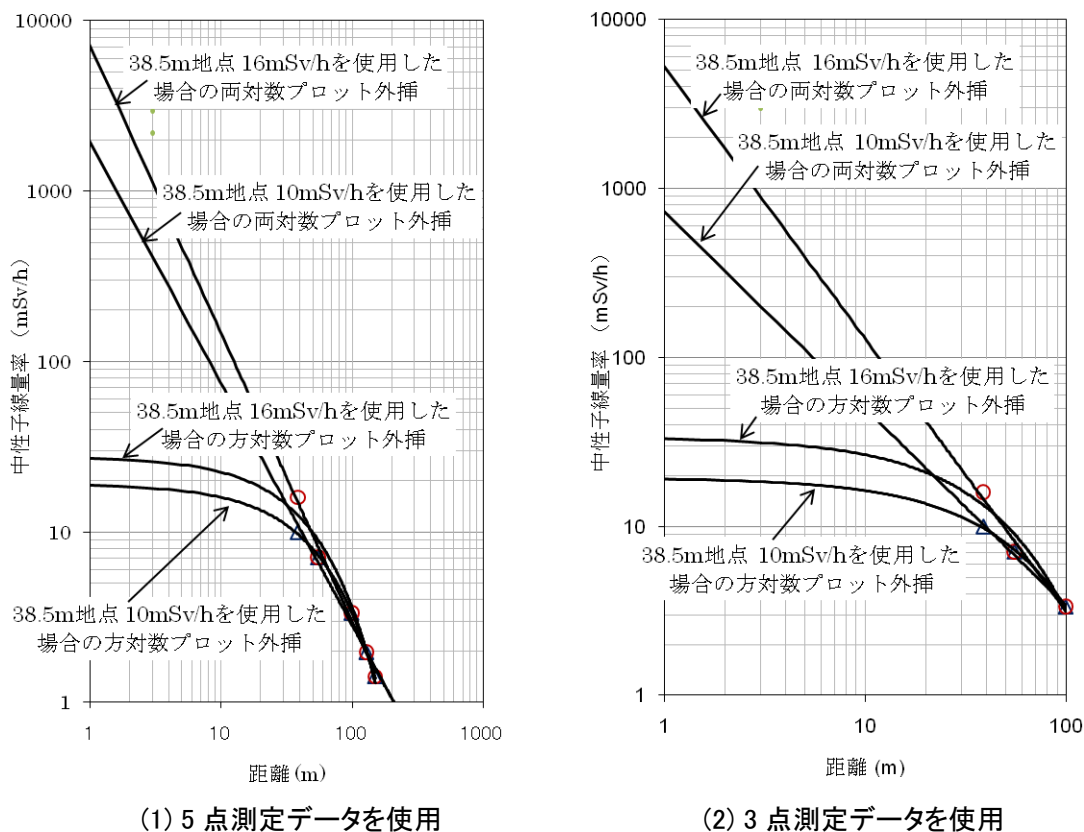


図6 臨界終息作業計画段階で測定された線量データを用いた
両対数及び方対数プロットによる外挿

表2. 両対数/方対数プロットのフィッティング式による3m地点の中性子線量率

(mSv/h)

外挿方法	5点データ フィッティング	3点データ フィッティング	実測値
両対数プロット (38.5m 地点 16mSv/h)	1116	899	平均 550 最大 1500
両対数プロット (38.5m 地点 10mSv/h)	410	202	
方対数プロット (38.5m 地点 16mSv/h)	26	31	
方対数プロット (38.5m 地点 10mSv/h)	18	18	

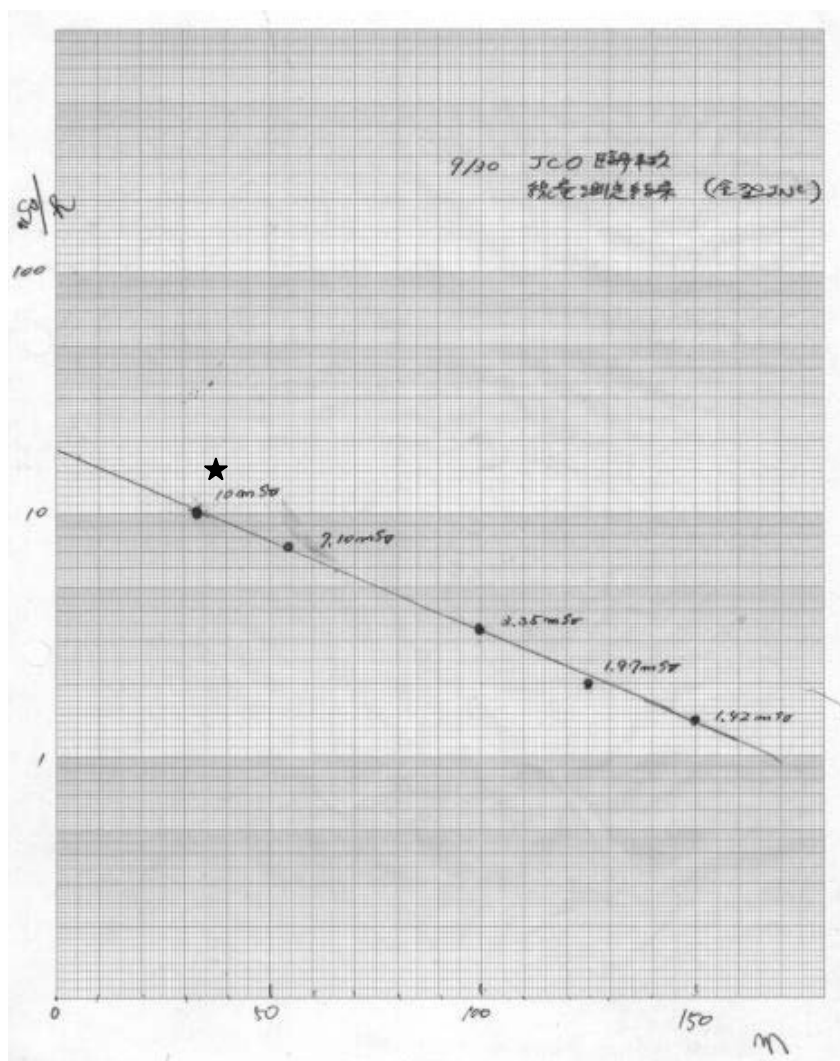


図7 中性子線プロット原図

(★印は 38.5m 地点、16mSv/h のプロット)

3.3 線量管理における作業計画とその見直しの重要性

本検討では、当初の臨界終息作業地点の線量予測が必ずしも適切にできなかった原因についてより深く検討した点について述べたが、放射線作業の安全確保（線量管理）は、線量予測によるものだけでない。実際、当初の線量予測に基づき作成された作業計画では、線量予測にさらに**安全余裕**を考慮し、適切な**作業時間管理**、アラーム付き線量計による**線量管理**など**複合的管理**を行うことが計画された。さらに、第1回作業の結果から、当初の線量予測を越えた線量場であることが認識され、その後の作業計画に適切に反映されており、最終的には計画内の被ばく線量に納まる結果となっている。

4. 防災業務関係者の被ばく線量について

防災業務関係者の被ばく線量について検討する際に関連する主な ICRP 勧告の展開についてふれたい。1977 年の ICRP 勧告 ICRP Publication 26 において、通常の放射線防護の基本に、行為の正当化、被ばくの最適化、線量制限の 3 つの考え方を明確にした。しかし、事故時には、必要な介入をすることにより線量を低減させることとし国の責任で決定すべきこととした。その後、1984 年勧告を経て、ICRP 1990 年勧告 (ICRP Publication 60) となった。現在の我が国の法令は、基本的には、ICRP 1990 年勧告を基礎としたものとなっている。Publication 60 においても、事故時には、介入の正当化、正味の便益の最適化の考え方としている。その後の、Publication 63 では、公衆に関する介入措置についても示し、我が国をはじめとして広く使われている。

現在、最新の勧告は、2007 年の Publication 103 であり、その中でも緊急時被ばく状況について記されている。Publication 103 では、予測線量、残存線量の概念を導入し、20mSv~100mSv の参考レベルにより正当化、最適化を図る考え方となっているが、我が国の法令への取り入れに関する議論は今後のものとなっている。

これらの ICRP 勧告及び、IAEA の報告書の放射線防護の考え方を参考にして、我が国の現段階における、防災業務時の放射線防護については、以下に示す法律と、原子力安全委員会の指針に沿って管理することが妥当と考えられる。

- ① 原子炉等規制法（以下、「炉規法」という。）及び放射線障害防止法等による規定の、放射線業務従事者の線量限度の規定について、主なものを以下に示す。

線量限度	実効線量で 100mSv/5 年 50mSv/年 眼の水晶体：等価線量で 150mSv/年 皮膚：等価線量で 500mSv/年
緊急作業に係る線量限度	実効線量で 100mSv 眼の水晶体：等価線量で 300mSv 皮膚：等価線量で 1Sv

- ② 原子力安全委員会では、原子力施設等の周辺の防災活動をより円滑に実施できるようにするため、「原子力施設等の防災対策について」（以下、「防災指針」という。）において、その被ばく線量について以下の指針を取りまとめた。

災害応急対策活動及び災害復旧活動を実施する防災業務関係者	実効線量で 50mSv を上限
防災業務関係者のうち、事故現場において緊急作業を実施する者（例えば、当該原子力事業所の放射線業務従事者以外の職員はもとより、国から派遣される専門	実効線量で 100mSv を上限 眼の水晶体：等価線量で 300mSv

家、警察関係者、消防関係者、自衛隊員、緊急医療関係者等) が、災害の拡大の防止及び人命救助等緊急かつやむを得ない作業を実施する場合	皮膚：等価線量で 1Sv
-------------------------------------------------------------------	--------------

※ 防災業務関係者の定義

周辺住民に対する広報・指示伝達、周辺住民の避難誘導、交通整理、放射線モニタリング、医療措置、原子力施設内において災害に発展する事態を防止する措置等の災害応急対策活動を実施する者及び放射性汚染物の除去等の災害復旧活動を実施する者

炉規法及び防災指針における、緊急作業の場合の防災業務関係者及び事業者としての作業の線量の限度は 100mSv である。これまで、この限度を用いた判断がなされた事例は、国内では東海村の臨界事故の場合のみと考えられる。したがって、この限度の実際の適用に関する考え方についてもこの事故の場合を事例として検討することが重要となる。

5. まとめ

5.1 作業計画時における線量及び測定法の考え方

臨界事故の終息作業のような、中性子線の高い線量場における作業計画段階では、作業における正確な線量予測が重要となる。しかし、より正確な線量の予測を行うことと、線量測定作業員の線量の低減化とは、矛盾する関係にある。JCO 臨界事故の作業経験を基にすると、線量予測のための作業員の線量管理は、①法令の定める年間線量限度、②作業者の当該作業以外で受けた線量、③測定誤差、の三点を考慮する必要がある。したがって年間 20mSv の 2 分の 1 の 10mSv 程度を目安とすることにより、安全裕度を持って作業できるものと考えられる。また、線量予測のための測定は、遮蔽・散乱が小さい地点を選び、距離にして 30m～100m 程度、線量率で 20mSv/h～5mSv/h 程度を目安として、3～5 点程度測定すべきと考える。測定点数については、以下の線量測定の正確性と、被ばく線量の両面から検討することが適当であろう。

5.2 測定点数と両対数プロットを使用する範囲の検討

既報で、両対数プロットで、3 点の測定値を用いることで、すべての測定値が誤差の範囲で一致し、かつ被ばく線量的にも妥当との結論となった。ただし、今後、作業計画を立案する際には、線量率の違い、散乱の程度により片対数あるいは、両対数のどちらを使用すべきか検討をした。既報で用いた測定点からの分析の結果、おおむね 100m 以内においては、両対数で直線となると考えられ、100m 以遠においては片対数で直線となると考えられる。また、200m 以遠の測定点を用いて方対数の直線外挿を行うことは、極めて過小評価になることを示している。

測定点数に関しては、3 点と 5 点では 20 パーセント程度の差異となり、測定点数は少なくとも 2 点必要であり、かつ正確な測定値が必要となる。したがって、これらの各要素を考慮に入れ、総合的な視点からの線量の正当化、最適化等の判断をすべきであろう。

また、東海村臨界事故においても、第一回目の作業の測定結果を次回以降の線量管理に使用したことが作業員の線量管理にきわめて有効であった。したがって、事故時の作業の管理において、重要と思われることは、事前の予測の重要性はもちろんのこと、作業途中においても、絶えず測定評価を継続し、その結果を活用して線量管理を適切に行うことと考えられる。

5.3 線量限度について

既報において、事前の放射線測定段階の線量は、実測値はないものの、合計で約 10mSv 程度と評価され、実作業の線量の数分の一であったことを報告した。これは、上述した我が国の線量限度の範囲に入っており、また、今後の同種の作業における線量管理において目標を設定する上での参考となる値と考えられる。

今後は、防災業務関係者の具体的作業に応じ、線量の最適化、正当化、低減化について、最新の国際的動向も念頭に入れつつ、具体的な検討を進めていくことが重要であろう。

参考文献

1. 原子力安全委員会, ウラン加工工場臨界事故調査委員会最終報告書, 原子力安全委員会, 1999
2. 日本原子力学会 JCO 臨界事故調査委員会, JCO 臨界事故その全貌の解明, 東海大学出版会, 2005
3. 遠藤葦, 山口恭弘, 藤元憲三, “特集 ウラン燃料加工施設における臨界事故, [IX] 周辺環境及び住民の線量評価”, 日本原子力学会誌 Vol.42, No.8 (2000)
4. 金盛正至他, Na の体内放射能測定とモニタリングデータを用いた JCO 臨界事故における従業員等の被ばく線量管理, 日本原子力学会誌 Vol.43, No.1, p.56~66, 2000
5. 金盛正至, JCO 臨界事故の終息作業について, JNC-TN8440 2001-018, 2001
6. JCO 臨界事故調査支援原研タスクグループ, JCO 臨界事故における原研の活動, JAERI-Tech 2000-074, 2000
7. 原子力安全委員会, (株)ジェー・シー・オー東海事業所臨界事故による人への線量の状況と今後の取り組みについて, 第五回原子力安全委員会資料第三号, 2000
8. 金盛正至他, JCO 臨界事故に対するサイクル機構の支援活動, JNC-TN8450 2003-009, 2003
9. 金盛正至, 東海村臨界事故終息作業員の線量管理, 放射線防護医療 2, 放射線防護医療研究会, ISSN 1811-4999 (2006)
10. 金盛正至他, 臨界事故終息作業時の線量管理方法の考察, JAEA-Technology 2009-043, 2009
11. 金盛正至, JCO 臨界事故の終息作業, JAEA-Technology 2009-073, 2010
12. Masashi Kanamori, JCO Criticality Accident Termination Operation, JAEA-Technology 2009-079, 2010
13. Masashi Kanamori, et al. A Study on Dose Evaluation for Tokaimura Criticality Accident Termination, JAEA-Technology 2010-025, 2010

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		m ² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m ²	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)/2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

