

<概要>

六フッ化ウラン（UF₆）はウラン濃縮施設や再転換施設で大量に取り扱われ、気体になり易い有毒な物質である。そのため、これらの施設で死亡者を含む多くの漏洩事故が発生している。気体状UF₆を吸入した時の有害な健康影響としては、放射線影響と化学的影響がある。事故時の急性暴露による影響では、²³⁵U濃縮度が低いウランの場合、化学的急性影響が優越する。化学的急性影響は通常、三つの影響（症状）クラスに分類され、それぞれの影響クラスに対応する毒性しきい値が整備されている。UF₆については、米国で最も権威のあるデータセット；AEGLの基準値が推奨されている。実際の漏洩事故時におけるUF₆の挙動は複雑で、特に大気中湿分との加水分解反応で生じるフッ化水素（HF）による急性影響は、事故被害の中心となる。従って、事故時の影響を予め評価する際は、適切な計算手法・モデルを採用する必要がある。ここではUF₆規制の現状として、欧米諸国を紹介する。我が国においては、UF₆の化学的影響の規制枠組みは2013年7月に原子炉等規制法に整備された。

<更新年月>

2014年01月

<本文>

はじめに

六フッ化ウラン（以後UF₆）は、気体にし易く（例えば、大気圧では56.6℃以上で気相が安定）、天然のフッ素は同位体が1個のみなので、²³⁵U同位体の濃縮が必要となった時に原料物質として採用された。それ以来、ガス拡散法及びその後の遠心分離法においてUF₆が用いられてきた。そこでは、天然ウラン（以後N-Uと記す）をUF₆の形に変えてから²³⁵Uが同位体濃縮される（酸化ウラン等をUF₆に変える化学操作を転換という）。世界的には、これ迄に軍事用（高濃縮）と原子力発電用（低濃縮）の合計で数百万トンのウランがUF₆に転換され同位体濃縮された。UF₆は常温、常圧では固体が安定なので、シリンダー容器での輸送や貯蔵に適し、ウラン濃縮工程で発生する劣化ウランの大部分は、UF₆の形のままシリンダー容器に充填し保管されている。2005年時点における世界の劣化ウランUF₆貯蔵量は約150万トンUと推定され、日本には2012年時点で1万6千トンU相当以上のUF₆が貯蔵されている。固体状UF₆は低温・低圧では気体になり、昇温・昇圧により液体となるので、化学処理・移送操作は、温度と圧力を制御することによって行われる。UF₆の状態図を図1に示す。

この様に核燃料サイクルにおいて重要な役割を担うUF₆は、発電炉燃料として用いる時には酸化ウラン（UO₂）燃料に「再転換」されるので、UF₆を取り扱うフロントエンド（濃縮施設、転換/再転換施設）においてのみ、その安全性が検討課題となる。

UF₆が漏洩した事故例は世界的に20件以上知られており、作業従事者の死亡を含む人的被害の主たる原因は、UF₆の化学毒性によるとされている（表1参照）。

1. UF₆の有害な健康影響

前章で記したように、我が国では、フロントエンドの特に濃縮施設、再転換施設においてのみ、気体状、液体状のUF₆が取り扱われる。ウラン吸入による有害な健康影響が規制（評価）の対象とされるのは、これらの施設である。また、通常操業時にはUF₆は密封系内に閉じ込められているので、従事者の慢性暴露は無視できる。したがって、安全上重要なのは、漏洩事故時のUF₆の急性暴露による影響であり、UF₆吸入による急性影響と晩発性影響である。次に、UF₆吸入

による放射線影響と化学的影響のそれぞれについて述べる。

(1) 放射線影響

ウランは放射性元素であり、その主な構成核種である²³⁸U、²³⁵Uはそれぞれウラン系列、アクチニウム系列という壊変系列を伴うため、ウランを吸入（内部被ばく）すると、それら核種からのα放射線が主に（晩発性）放射線影響をもたらす。ウランはその²³⁵U濃縮操作によって同位体組成が変わり、比放射能も変化するので、放射線影響の大きさは濃縮度に大きく依存する。ウランの同位体の中でも²³⁴Uは、存在比は小さい（0.0055%）が²³⁸Uや²³⁵Uと比較して半減期が短く

（約24万年）比放射能が大きいので、その影響は無視できない。UF₆の吸入による内部被ばく線量は、ICRPの人体モデル（ファントム）と線量係数を用いて、**預託実効線量**として求めることが出来る。UF₆は水溶性であるので、吸入後の血液中への移行が速いFタイプとして線量係数が求められている。様々な濃縮度のウラン（UF₆）について、放射線影響を求めた例を表2に示す。我が国で扱われるUF₆は、²³⁵U濃縮度が5%以下であるので、表2のN-Uと5%濃縮Uの結果を比較すると、**実効線量**が1mSvとなる吸入ウラン量は、N-Uで65mg、5%濃縮Uで13mgとなる。

(2) 化学的影響

ウランは古くから、重金属毒性により腎臓組織を損傷することが知られていた。一方、発がん性に関する情報や、遺伝毒性、発生・生殖毒性に関する情報は少ない。そのため、現在では、ウランの化学的影響は確率的影響や晩発効果は無視され、世界的に急性影響のみが注目されている。急性影響には、ある値までは影響が現われない、いわゆる「しきい値」がある。

化学的急性影響は、一般に目安となる症状・生物学的事象（エンドポイントという）を指標に、1) 軽度で可逆的（暴露の停止により正常に回復する）効果、2) 重度で不可逆的（長期にわたり回復不能な）症状、3) 重篤で致命的な症状（死亡も含まれる）、の三つにクラス分類され、それぞれの指標に対して「しきい値」が設定されている。

欧米諸国では、多くの有害化学物質に対して、三つの影響クラスに対する毒性しきい値のデータベースが整備され、これらの物質を大量に扱う施設に対する事故時の影響評価（土地利用計画上の妥当性検討、及び緊急時対応計画の策定）に利用されている。我が国には現在はその様な制度が未整備なので、有害化学物質の毒性データの整備は遅れており、UF₆の毒性基準データ（しきい値）も無い。

UF₆は水溶性であるので、吸入時に体液（90%以上が水）と接すると容易に溶解し、フッ化ウラニル（UO₂F₂）とフッ化水素（HF）になる。従って、UF₆の化学的影響は、ウラニルイオン UO₂²⁺によるものとHFによるものと考えられている。影響が小さいクラス1)の領域では、分解生成物のHFによる影響が主となって現われ、クラス2)、3)の領域では、UO₂²⁺の影響が主となる。表3にUF₆の化学的影響の内容をクラス毎に示す。

(a) 化学的影響のガイドライン（指標）

様々な有毒化学物質を用いる産業活動において、それらの物質が人間の生活圏に漏れ出すことによる健康への有害影響を抑制し管理するために、それら物質の環境中の濃度を制限するガイドラインが開発されている。UF₆の漏洩事故時に大気中に漏洩したUF₆の「吸入摂取量」は、大気中濃度に依存する。UF₆の値が記載された主なガイドラインを表4に示す。これらでは共通して、前章で述べた影響クラスに対応した「しきい値（空气中濃度）」が設定されている。すなわち、UF₆の空气中濃度がそのしきい値を超えると、その影響クラスに対応する影響が発現する。しきい値は、吸入する時間により異なる。例えば、AEGL（Acute Exposure Guideline Level）では、3つの影響クラスに対応して、AEGL-1、AEGL-2、AEGL-3という空气中濃度しきい値が、吸入時間；10分間、30分間、1時間、4時間、8時間に対して示されている（表5参照）。

(b) 放射線影響との比較

ある量のUF₆を（事故時に）吸入した時、化学的影響と放射線影響のどちらの影響がより顕著に現われるのか、という課題を考える。図2には、UF₆気体を含む空気を1時間呼吸した時、図の上部に、吸入U量とその時の化学的影響を表4のAEGLのしきい値を参考に影響クラス毎に示し（化学的影響）、図下部に、表2を参考に、吸入したU量による**預託実効線量**；1mSvと5mSv（放射線影響）を示す。この図から、天然Uの場合、吸入による**預託実効線量**が1mSvの時、その吸入U量（65mg）は、化学的影響におけるクラス3)の領域にあり、重篤な腎機能傷害が現われること、また5mSvに相当する吸入U量～330mgでは、すでに致死の可能性もあることが解る。5%濃縮ウランでは、より少ない量で対応した**預託実効線量**を与えるが、それでも、5mSvの時（65mg）には、化学的影響はクラス3)に相当する。この様に、U吸入量が放射線による急性効果を全く生じない程度に小さい時でも、重篤な化学的影響が発現する可能性がある。参考までに、より放射線影響が大きい93%濃縮ウランについて考察すると、5mSvに相当する吸入U量（3.8mg）は、影響クラス1)の化学的急性影響を発現する。5mSvの実効線量は、急性効果は生じないが、晩発効果を伴う事に注意すべきであろう。

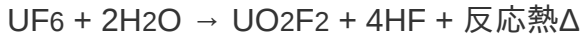
2. UF₆漏洩事故の特徴

UF₆の漏洩事故には、次の特徴がある。

(1) UF₆が処理系や容器から漏洩する時の状況により、その物理的状態が気体、液体又は両者の混合体と変化する。それらの放出速度、温度も多様である。

(2) 漏洩後のUF₆の挙動は複雑である。その理由は、

1) 空气中湿分と迅速な加水分解反応を起こし、腐食性のフッ化水素；HFを生じる。



2) UF₆蒸気は重い気体（空気の比重の12倍）であり、UO₂F₂は室温で固体、HFは水和し、多量体を生成する（比重は空気より重い）。

3) 反応熱 Δ は、117kJ/mole UF₆と大きいので、周辺の気体温度を上昇させる。

上記1)の加水分解生成物HFは、皮膚や呼吸器系組織を強く刺激・破壊し、最悪の場合は死亡する。UF₆漏洩環境の大気湿度により、上記反応によるUF₆の消費（UO₂F₂の生成）とHFの発生速度・分布は影響を受ける。生成したUO₂F₂は沈降して空気中のU濃度は減少する。また2)から、空気流速が小さい時は、どの成分も上昇拡散しないが、3)の影響で浮力を生じると、上方に拡散移行する。この様に、漏洩事故時のUF₆の挙動は、周囲の条件に大きく依存する。

(a) フッ化水素（HF）の影響

表1に示すように、これ迄に知られているUF₆漏洩事故のうち2件で従事者が死亡している。これらの主要な死亡原因は、Uの毒性によるものではなく、HFによる肺機能損傷であるとされている。従って、UF₆漏洩事故における健康影響を考察する場合、HFの寄与は非常に大きい。表6にHFの化学的影響の内容をクラス毎に示す。また表7には、HFのガイドラインの例として、3つの影響クラスに対応したAEGL-1、AEGL-2、AEGL-3の空气中濃度しきい値を示す。

(b) UF₆漏洩事故の事象解析モデル

上述のように、UF₆の漏洩・移行事象は大変複雑で、放射性物質の様に単純なエアロゾルの拡散移行とは異なる。過去に米国や仏国（フランス）で繰り返された事故は、信頼できる解析モデルの開発努力を促した。それらの開発状況は、米国のNRC（原子力規制委員会）レポート；NUREG/CR-6481、及びNUREG/CR-6410にまとめられている。主な計算コードには、HGSYSTEM/UF₆、RASCAL、ARCON96等がある。仏国では、IRSN（放射線防護原子力安全研究所）においてSUBLI-UF₆が開発された。これらのコードを利用する際は、その適用条件と範囲、コードの特性に十分配慮する必要がある。

(c) UF₆漏洩事故の評価例

米国におけるウラン濃縮施設のUF₆漏洩仮想事故の解析結果例を表8に示す。

3. UF₆の規制

UF₆の化学的影響の規制方法は国により異なっている。

(a) 事故時のUF₆急性暴露に関する規制

○米国では、有害化学物質の環境漏洩は環境保護庁（EPA）が規制している。そのため、NRCはEPAとの間で、UF₆の管理はNRCが行うという「了解覚え書き」を結んでいる。具体的には、連邦規制法「10 CFR part70.61 (subpart H)」において、総合安全解析法（ISA）による解析を行うこと、その結果において、事故の化学的影響の大きさを区分するために、AEGL（Acute Exposure Guideline Level；米国）又はERPG（Emergency Response Planning Guidelines；米国）のしきい値を適用する事が指示されている。特に、公衆に対する高影響度の基準として、AEGL-2、ERPG-2と共に可溶性U摂取量30mg以上という値が示されている（表9参照）。

○EU諸国は、1996年の欧州閣僚理事会指令；セベソII指令に従い、有害化学物質が漏洩する重大事故を防止するため、1999年2月3日までに国内法を整備することが義務づけられていた。仏国のしきい値基準は、土地利用計画の目的で基本原子力施設（INB）の一般規則を定めるアレテ（省令）に従い、2005年9月29日のアレテの付属書2に「放射線以外の影響評価に用いる基準値」として記載されている（表10に、急性毒性しきい値の区分を示す）。具体的なしきい値は、国立産業環境・リスク研究所（INERIS）が開発し公開している。英国の場合、毒性判断基準としては健康安全局（HSE）が示したSLOT（Specified Level of Toxicity）及びSLOD（Significant Likelihood of Death）がある。SLOTは、土地利用計画を目的に「エリア内のほとんど全ての人は激しい苦痛を受け、かなりの人は医師の診察を要し、一部重傷者は長期間の治療を要する、及び感受性の高い人は死亡する」レベルであり、SLODは50%致死量として設定されている。具体的な値はHFについては示されているが、UF₆の値は記載されていない。

(b) 職業（慢性）暴露に関する規制

我が国の原子力産業界では、ウランの職業暴露は考慮しなくてもよいので、ここでは、米国のいくつかの規制値を紹介するにとどめる（表11参照）。

(c) 日本の規制現状

我が国の原子力安全規制では、従来、有毒な化学物質に係わる事故時の化学的健康影響は規制対象とされず、評価もされてこなかった。しかし、過去の事故例からもUF₆の化学的有害性は無視できない事、欧米諸国においては、原子力規制当局がUF₆の化学的影響の管理・規制を行っている事から、原子力規制委員会は、UF₆を取り扱うウラン濃縮施設と再転換施設を対象に、重大事故時の影響評価を行う事を決定し、2013年7月に原子炉等規制法に整備した。その具体的経緯と内容については、以下の原子力規制庁の公開資料が参考になる。

- ・ウラン燃料加工施設において取り扱われる六フッ化ウランに関する対応について
(平成25年7月17日 第15回規制委員会決定)
- ・核燃料施設等の新規規制基準施行後の適合確認のための審査の進め方について
- ・核燃料施設等に係る現状確認の進め方について
- ・核燃料施設等における新規規制基準の適用の考え方
- ・核燃料物質の加工の事業に係る加工事業者の重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準の制定について、
- ・ウラン燃料加工施設における六フッ化ウランの取扱いが一般公衆に及ぼす化学的影響に関する確認の進め方について
- ・ウラン燃料加工施設における六フッ化ウランの取扱いが一般公衆に及ぼす化学的影響に関する報告の提出について（指示）
- ・六フッ化ウランが一般公衆に及ぼす化学的影響に関する確認事項

<関連タイトル>

[劣化ウランとその利用 \(04-02-01-11\)](#)
[六フッ化ウランの製造（ウランの転換） \(04-04-02-01\)](#)
[二酸化ウランおよび金属ウランの製造 \(04-04-02-02\)](#)
[遠心分離法によるウラン濃縮 \(04-05-01-04\)](#)
[ガス拡散法によるウラン濃縮 \(04-05-01-05\)](#)
[分子法レーザーウラン濃縮 \(04-05-01-14\)](#)
[六ヶ所ウラン濃縮工場 \(04-05-02-03\)](#)
[六フッ化ウランから二酸化ウランへの再転換 \(04-06-02-01\)](#)
[核燃料物質等の輸送および貯蔵中の事故 \(04-10-03-06\)](#)
[六フッ化ウランおよび二酸化ウランの輸送 \(11-02-06-03\)](#)

<参考文献>

- (1) (独) 原子力安全基盤機構：六フッ化ウラン漏洩事故時の化学的影響とその評価方法、JNES-RE-2013-2021（2013）.
- (2) 日本保健物理学会：ウランの健康影響検討専門研究会報告書、日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ、Vol.6 No.1 2008年4月.
- (3) 食品安全委員会：評価書 食品中に含まれる放射性物質、VI章 ウラン、2011年10月.
- (4) U.S. Department of Health and Human Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, : Toxicological Profile for Uranium, (2013) .
- (5) Fell T.P. et al; Assessment of internal doses to workers potentially exposed to enriched uranyl fluoride and uranium tetrafluoride, NRPB-W56, 2004
- (6) EPA,“Acute Exposure Guideline Level”,
- (7) National research council, “Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals”, Volume 4, Appendix3 and 5, (2004)
- (8) NRC, “Review of Models Used for Determining Consequences of UF₆ Release”,

NUREG/CR-6481, (1997) .

(9) NRC, "Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook," NUREG/CR-6410, (1998)

(10) 10 CFR part 70 subpart H, "Additional Requirements for Certain Licensees Authorized to Possess a Critical Mass of Special Nuclear Material", (Sep.2000) .

(11) NRC, "Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Fuel Cycle Facility", NUREG-1520 Rev.1, (2010)

(12) NRC : Safety Evaluation Report for the Eagle Rock Enrichment Facility in Bonneville County, Idaho, NUREG-1951, (2010)

(13) NRC : Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico, Louisiana Energy Services, NUREG-1827, (2005)

(14) IRSN, : Comportement de l'UF6 en cas de Rejet Accidentel in Rapport Scientifique et Technique 2007, Chapter 2.4 (2007) .

(15) INERIS, "Seuils de Toxicite aigue Hexafluorure d'uranium", DRC-10-103128- 02257A, (2010) .

(16) INERIS, "Seuils de Toxicite aigue Acide Fluorhydrique", DRC-08-94398-12729A, (2008) .

(17) INERIS, "Technical Guidance document for selecting acute toxicity threshold values in the absence of official French values", DRC-09-103128-07577A", (2009) .

(18) HSE, "Toxicity levels of chemicals", <http://www.hse.gov.uk/chemicals/haztox.htm>

表1 六フッ化ウラン漏洩事故(死傷者を伴った2件の事故)の概要

1. マンハッタン工兵管区パイロットプラントの事故	
概要	1944年9月2日、フィラデルフィア海軍工廠内、熱拡散法の研究開発施設で発生。 気体状のUF ₆ が収納された2.4m×0.2mのシリンダーの溶接部が破裂、シリンダーがロケットのように164m飛んで、その進路にあったパイプや備品を引きちぎり、推定182kgのUF ₆ を放出、工程からの水蒸気と反応しHF、UO ₂ F ₂ を生成した。破裂現場から91.4 mの範囲は、UF ₆ および加水分解生成物から成る濃い雲に覆われた。その雲はすぐに消散し、曝露時間は17秒間と推定された。
被害状況	20人の従業員が暴露し、その程度は、破裂時にいた場所によって様々だった。 死亡者は2人で、どちらもシリンダーが直接見通せる場所において、1人は暴露から10～16分後に、もう1人は70分後に死亡した。3人が重傷を負い、12人が観察のために入院し、3人が無症状だった。 重傷者は、水腫を伴う化学性結膜炎や角膜の化学腐食(一過性盲になった)、第1度、2度、3度の化学的熱傷、悪心嘔吐、化学的気管支炎、肺水腫、ショックなどの症状があった。重傷者の1人は、血球数検査で血液濃縮が示唆され、タンパク尿と尿円柱が認められた。別の重傷者は、基本的に血液数値は正常だったが、アルブミンと尿円柱が観察された。重傷者は事故から3週間以内に完全に回復した。 重傷者の2人が、事故から38年後に沈着およびウラン暴露の長期的影響について再検査を受けた。初期の肺沈着は、事故直後に得た断片的な尿中排出データに基づいてウラン40～50 mgと推定され、初期の長期的骨沈着は最高濃度で暴露した従業員で410 μg(5.2Bq)と推定された。これは、骨への40年間の預託実効線量約2mSvを生じることになる。重傷を負った従業員2人について38年間、フォローアップ健康診断を行った結果から、検出可能なウランの沈着がなく、ウラン暴露に起因する所見が見られないことが明らかになった。
2. Sequoyah Fuels Corp. UF ₆ 転換施設の事故	
概要	1986年1月4日、オクラホマ州ゴアの施設で発生。 容量12,700kgのシリンダーに約13,500kgのUF ₆ を過充填し、過剰のUF ₆ を取り除くために蒸気室で加熱している間に、シリンダーが破裂した。放出は約40分間続いた。放出時に生じた結晶状UF ₆ が蒸気室エリアの周囲に広範囲に飛散した。その領域に散水した時に、残っていたUF ₆ が水と反応して、おそらく噴霧水に溶解したと思われる。放出されたUF ₆ の半分程度は非常用池に洗い流されたと推定された。 従って、約6,700kgが有毒な白雲となった。6,700kgのUF ₆ 全てが空气中湿分と反応すると、5,900kgのUO ₂ F ₂ と1,500kgのHFを生成する。ピーク時の10分間のUO ₂ F ₂ 濃度は0.011mg/m ³ ～8.8mg/m ³ 、HF濃度は0.008mg/m ³ ～2.4mg/m ³ だった。1時間平均のウラン濃度は、0.052 μg/m ³ 未満から20mg/m ³ までに及んだ。45分間に4,550kgのウランが大気中に放出されたと思われた。
被害状況	事故発生時にプラント敷地にいた従業員は42人だった。そのうちの7人(契約社員)は、放出点から十分に離れた風上に位置するトレーラーの中にいた。従業員1人(蒸気室から50 ft(15m)離れたスクラバー建屋内にいた運転員)は、HFの吸入による肺水腫で被ばくから数時間以内に死亡した。もう1人は、HFへの曝露による皮膚の炎症および熱傷の手当を受けた。その他の21人は、病院で検査を受けて、観察のため1晩入院した。21人のうちの4人は翌朝退院し、14人は2日以上入院してウランの排泄を促すために経口重炭酸ナトリウム剤の投与を受け、3人は、HFへの曝露による肺障害の観察および治療のために別の病院に転送された。煙霧に散水するために戻った8人の従業員のうち、1人は重度の呼吸器症状のために別病院に転送されたグループに含まれ、5人(HF熱傷を負った1人を含む)は、2日以上入院した。事故当日に帰宅できたのは8人中2人だけだった。 敷地外にいた周囲の住民も、病院で検査を受けるよう求められた。1人の住民が観察のため1晩入院したが、治療は不要と判断された。敷地内にいた従業員全員および敷地外の公衆100人から尿サンプルを集めて、ウランのバイオアッセイおよび尿検査(オスモル、クレアチニン、タンパク質、ブドウ糖、LDH、アルブミン、βミクログロブリン、nアセチルβグルコサミニダーゼ)を実施した。契約社員を除いた従業員の平均推定摂取量は、0.26mg～27.63mgで、契約社員の摂取量は、0.02mg～7.73mgだった。全従業員の平均は、6.5 mgだった。 敷地外の住民100人のウランのバイオアッセイ・データは、推定ウラン摂取量が0.1mg～0.9mgであることを示していた。

下記の出典をもとに作成した

【出典】 National Research Council, “Uranium Hexafluoride” in Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals, Volume 4, Appendix 5, (2004)

表2 UF₆の放射線影響-吸入による預託実効線量

ウランの特性		吸入時の放射線影響	
対象ウランの種類 同位体組成: (²³⁴ U/ ²³⁵ U/ ²³⁶ U/ ²³⁸ U)	比放射能*1 (Bq/mg)	線量係数*2 (μSv/Bq)	1 mSv 相当の ウラン量 (mg)
天然 ウラン (0.005/0.72/0/99.27)	25.2	0.61	65
5%濃縮 ウラン (0.0045/5/0.0031/94.9)	121	0.64	13
20%濃縮 ウラン (0.18/20/0.12/79.7)	446	0.65	3.4
93%濃縮 ウラン (0.84/93/0.57/5.6)	2028	0.65	0.76

*1:子孫核種の放射能は無視している。

*2: ICRP Pub. 68 に従い、ウラン化合物の特性を Type F、AMAD = 5 μm とした時のデフォルト値である。

下記の出典をもとに作成した

[出典] Fell T.P. et al; Assessment of internal doses to workers potentially exposed to enriched uranyl fluoride and uranium tetrafluoride, NRPB-W56, 2004.

表3 UF₆の吸入による健康影響

影響 クラス	影響(傷害)の内容
1 回復性	不快感や鼻腔粘膜、気管支、眼等への刺激症状。暴露停止により回復する。 これらは、体液への溶解により生成するHFの毒性効果である。
2 不可逆性	腎臓障害;尿細管の上皮細胞を損傷・壊死。糸球体の変性、壊死、蛋白尿滞留、 血管変性、利尿増加、腎臓機能障害マーカーの上昇 他の器官障害;脳中枢神経系、生殖器系、肺呼吸器系、消化器系、肝臓や皮膚、 免疫系 HFの効果;肺の炎症、肺水腫
3 重篤・致死的	重度の腎不全、骨軟化症、骨密度の低下、骨から遊離したウランによる長期の 腎臓障害 HFの効果;重度の肺水腫、眼球外傷、皮膚火傷、視覚・粘膜・呼吸器炎症

下記の出典をもとに作成した

【出典】(1) National research council, “Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals”, Volume 4, Appendix 5 :Uranium hexafluoride, (2004)

(2) 日本保健物理学会:ウランの健康影響検討専門研究会報告書、日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ、Vol.6 No.1 2008年4月.

(3) 食品安全委員会:評価書 食品中に含まれる放射性物質、VI章 ウラン、(2011年10月)

表4 UF₆の化学的急性影響に関する主なガイドライン

影響クラス	既存のしきい値基準
1: 可逆的影響	(米) AEGL-1, ERPG-1 (仏) SER
2: 不可逆的影響	(米) AEGL-2, ERPG-2 (仏) SEI (英) SLOT-DTL
3: 致命的な影響	(米) AEGL-3, ERPG-3 (仏) SPEL, SELS (英) SLOD-DTL

AEGL : Acute Exposure Guideline Level

ERPG : Emergency Response Planning Guidelines

SER : Seuil des Effets Réversibles

SEI : Seuil des Effets Irréversibles

SPEL : Seuil des Premiers Effets Létaux

SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs

SLOT-DTL : Specified Level of Toxicity- Dangerous Toxic Load

SLOD-DTL : Significant Likelihood of Death- Dangerous Toxic Load

下記の出典をもとに作成した

[出典] (独)原子力安全基盤機構:六フッ化ウラン漏洩事故時の化学的影響とその評価方法、JNES-RE-2013-2021 (2013)

表5 UF₆のAEGL値

空气中濃度;mg UF ₆ /m ³ (mg U/m ³)					
	10-min	30-min	1-hr	4-hr	8-hr
AEGL-1	3.6 (2.4)	3.6 (2.4)	3.6 (2.4)	NR	NR
AEGL-2	28 (19)	19 (13)	9.6 (6.5)	2.4 (1.6)	1.2 (0.8)
AEGL-3	216 (146)	72 (49)	36 (24)	9.0 (6.1)	4.5 (3.1)

下記の出典をもとに作成した

【出典】 National research council, “Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals”, Volume 4, Appendix 5 :Uranium hexafluoride, (2004)

表6 HF吸入による健康影響

影響 クラス	影響(傷害)の内容
1 回復性	鼻腔粘膜、気管支、肺胞、眼等への軽微な刺激症状。暴露停止により回復する。炎症性因子やアトピーを示唆する因子の割合は増大する。
2 不可逆性	皮膚、眼や鼻、肺に回復不能の有害作用;鼻や喉の灼熱感、肺胞の水腫、咳と胸骨下部の痛み、衰弱、体重減少、吐き気、嘔吐、下痢、歯茎の障害(重篤な障害ではない) 局所的な皮膚や血管の破壊と痛み(骨にまで浸透する可能性有り)
3 致命的な影響	重篤な鼻腔炎・喉頭炎や気管支炎、肺の鬱血症状/呼吸困難。重度の眼刺激症状。心臓不整脈、肝臓の鬱血及び肝細胞の空胞化 重篤な低カルシウム血症(腎不全、肝不全)、腹部の出血、腹膜及び腹腔内器官の充血。しきい値は、致死閾値を参照に導出。

下記の出典をもとに作成した

【出典】(1) National research council, “Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals”, Volume 4, Appendix 3 :Hydrofluoric acid, (2004)

(2) AREVA Enrichment Service Inc. :Eagle Rock Enrichment Facility Safety Analysis Report, Rev.3 (2010)

表7 HFのAEGL値

空气中濃度; ppm, (mg HF/m ³)					
	10-min	30-min	1-hr	4-hr	8-hr
AEGL-1	1.0 (0.8)	1.0 (0.8)	1.0 (0.8)	1.0 (0.8)	1.0 (0.8)
AEGL-2	95 (77)	34 (27)	24 (19)	12 (9.7)	12 (9.7)
AEGL-3	170 (137)	62 (50)	44 (36)	22 (18)	22 (18)

下記の出典をもとに作成した

[出典] National research council, “Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals”, Volume 4, Appendix 3 :Hydrofluoric acid, (2004)

表8 米国ウラン濃縮工場の仮想的 UF₆ 漏洩事故の影響評価例

	仮想 事故	作業従事者 ^a			管理区域外/公衆個人 ^b		
		放射線影響 mSv	化学的影響		放射線 影響 mSv	化学的影響	
			UF ₆ mg/m ³	HF mg/m ³		UF ₆ mg/m ³	HF mg/m ³
Eagle Rock Enrichment Facility	1	142	2.0 x10 ⁴	6,830	0.06	1.43	0.54
	2	8.05	13	4.36	0.02	0.549	2.08
	3	1,220	1.7 x10 ⁵	5.9 x10 ⁴	2.93	69.8	26.4
URENCO USA Facility	4	high	high	high	9.7	250	86
	5	0.2	59	20	～ 0	0.07	0.024
	6	0.22	17	5.8	～ 0	0.02	0.0069

影響の大きさ  : 影響クラス1  : 影響クラス2  : 影響クラス3

事故内容: 1; 遠心試験施設 フィード容器の液圧破裂

2; 施設の広範な火災

3; 試料採取シリンダーからのUF₆ 漏洩

4; UF₆ シリンダーの液圧による破裂

5; UF₆ 取扱い区域の火災

6; UF₆ 処理ラインの破裂

a ; 作業者の脱出は、事故発生後 5分(EREF)、10分(UUF)とされている。

b ; 公衆個人の暴露時間は30分としている。

下記の出典をもとに作成した

【出典】Eagle Rock E. F., NUREG-1951 (2010), URENCO USA E. F., NUREG-1827 (2005)

表9 米国10CFR70.61による影響度区分

	従事者	周辺公衆	環境
高影響度	RD > 1Sv	RD > 250mSv	
	CD = 生命に危険 ERPG -3 又は AEGL -3 超	CD = 可溶性U >30mg の摂取 CD = 不可逆的又は重篤な 長期健康影響 ERPG-2又は AEGL-2 超	
中影響度	250mSv < RD ≤ 1 Sv	50mSv < RD ≤ 250mSv	放射性物質の放出量: 10 CFR part20 附則B 表2に示す許容濃度の 5000 倍以上
	CD = 不可逆的又は重篤な 長期健康影 ERPG -2 又は AEGL -3 超	CD = 穏やかで一時的な 健康影響 ERPG-1又は AEGL-1 超	
低影響度	上記のものより放射線、又 は化学暴露の小さい事故	上記のものより放射線、又 は化学暴露の小さい事故	上記のものより影響の 低い放射性物質の放出

RD :放射線被ばく量(実効線量)

CD :化学暴露量 ERPG及びAEGL表示はNUREG-1520を引用した。

下記の出典をもとに作成した

【出典】(1) 10 CFR part 70 subpart H, “Additional Requirements for Certain Licensees Authorized to Possess a Critical Mass of Special Nuclear Material”, (Sep.2000).

(2) NRC, “Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Fuel Cycle Facility”, NUREG-1520 Rev.1, (2010)

表10 仏国急性毒性しきい値の区分

しきい値区分	説 明
可逆的影響 SER	ある暴露時間に対して、この値を超えると可逆的な影響を受ける可能性のある空气中濃度である。
不可逆的影響 SEI	ある暴露時間に対して、この値を超えると不可逆的な影響が現れる可能性のある空气中濃度である。
亜致死的影響 SEL	ある暴露時間に対して、この値を超えると1%の死亡が観察される可能性のある空气中濃度である。
亜致死的影響 SEL	ある暴露時間に対して、この値を超えると5%の死亡が観察される可能性のある空气中濃度である。

SER: 可逆的影響のしきい値

SEL: 亜致死的影響のしきい値(1% 致死濃度)

SEI: 不可逆影響のしきい値

SELS: 致死的影響のしきい値(5% 致死濃度)

下記の出典をもとに作成した

[出典] INERIS, “Technical Guidance document for selecting acute toxicity threshold values in the absence of official French values”, DRC-09-103128-07577A”, (2009).

表11 米国におけるウランの職業(慢性)暴露の基準値

	目的	ウランの吸入量基準値
OSHA* PEL-TWA (8h/日) 29 CFR 1910.1000, Subpart Z	一般産業界における 労働者の暴露量に関する規制	水溶性、浮遊性粒子 <0.05 mg U/m ³ 不溶性 <0.25 mg U/m ³
NRC* 10 CFR 20.1201 (e)	原子力関連施設における 労働者の暴露量に関する規制	可溶性 < 10 mg U/週 ; 0.2 mg/m ³ × 1.2 m ³ /h × 40h/週 = 9.6 mg/週
ACGIH TLV-TWA (8h/日)	一般社会における職業暴露に 関する勧告又はガイドライン	可溶性又は不溶性 < 0.2 mg U/m ³
NIOSH REL-TWA (10h/日)	労働安全・衛生に関する勧告値	水溶性、浮遊性粒子 <0.05 mg U/m ³ 不溶性 <0.20 mg U/m ³

※：法的規制値である。

・OSHA (職業安全衛生庁)：国の機関

・NRC (原子力規制庁)：国の機関

・ACGIH (米国産業衛生専門家会議)：公的組織

・NIOSH (国立職業安全衛生研究所)：公的組織

下記の出典をもとに作成した

【出典】OSHA, NRC, ACGIH, NIOSHの各ホームページ

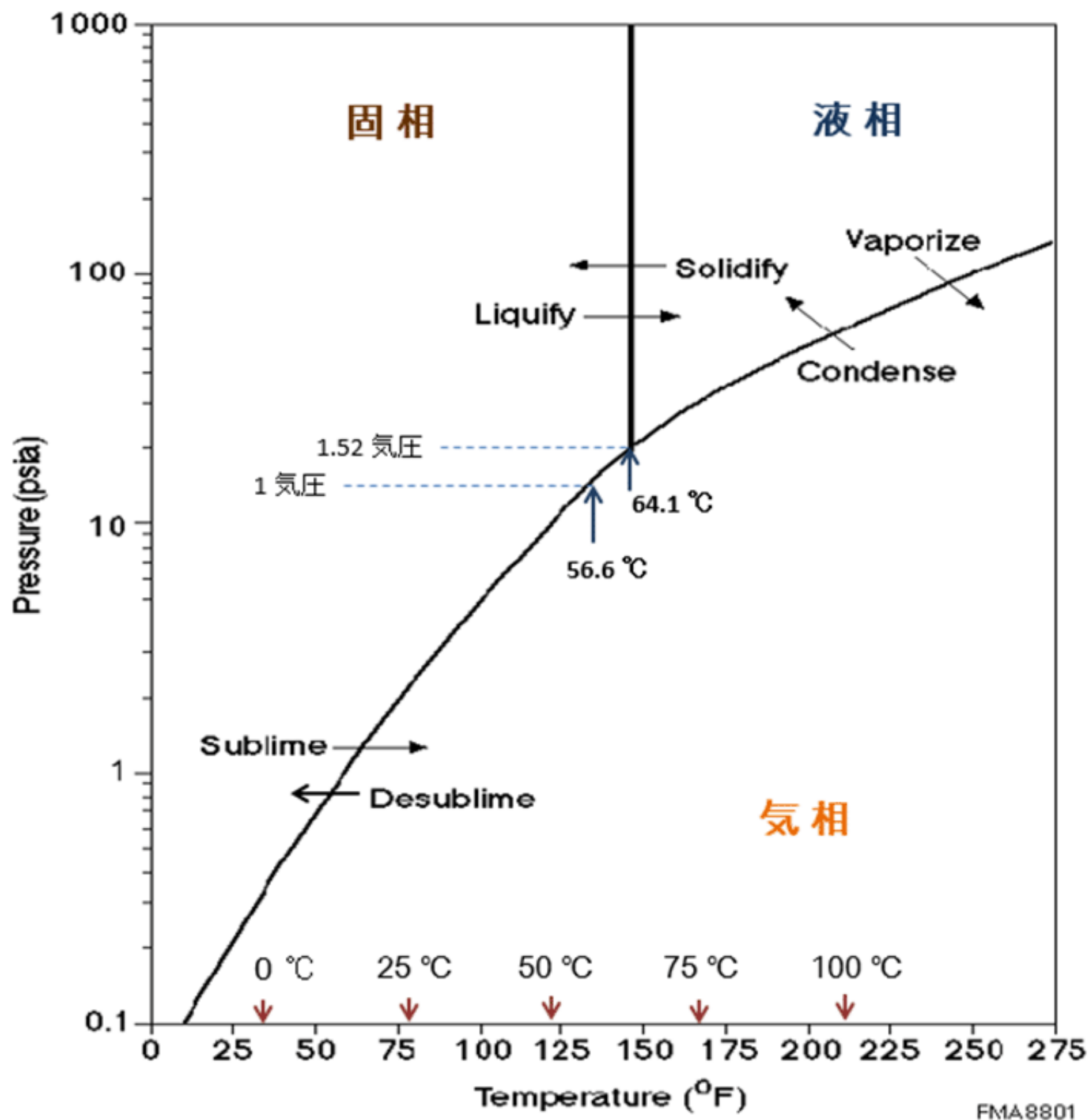


図1 UF_6 の状態図

下記の出典をもとに作成した

[出典] DOE Office of Nuclear Energy, Science and Technology, "Final Programmatic Environmental Impact Statement for Alternative Strategies for the Long-Term Management and Use of Depleted Uranium Hexafluoride", DOE/EIS-0269, (1999).

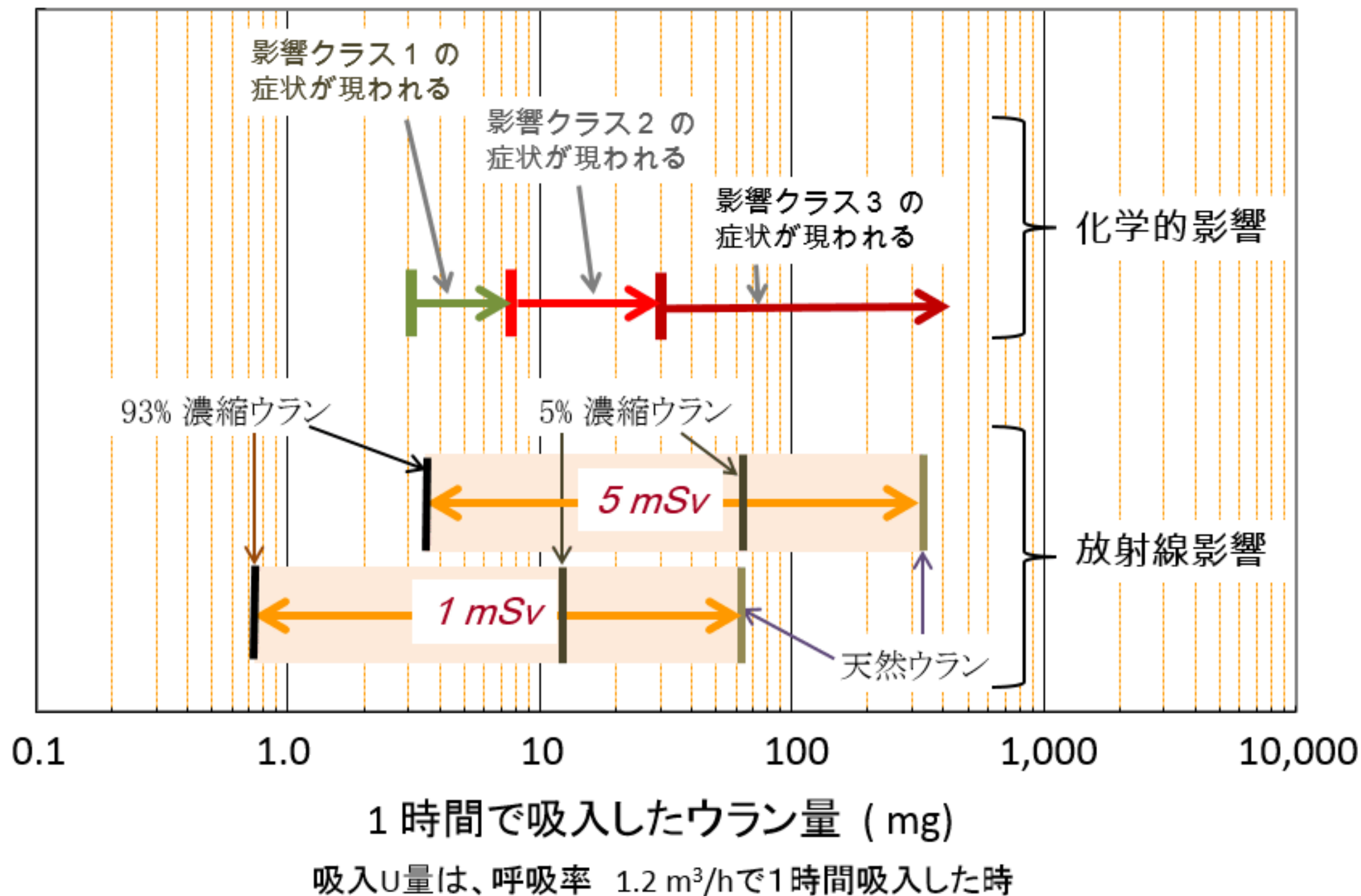


図2 UF₆吸入時の化学的影響と放射線影響の比較

下記の出典をもとに作成した

- 【出典】 1) Fell T.P. et al; Assessment of internal doses to workers potentially exposed to enriched uranyl fluoride and uranium tetrafluoride, NRPB-W56, 2004.
2) National Research Council, "Uranium Hexafluoride" in Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals, Volume 4, Appendix 5, (2004)