

解	説
---	---

米国における低レベル放射性廃棄物の管理と処分

福井正美^{*1}

(1989年6月16日受理)

Management and Disposal of Low-level Radioactive Waste in the US

Masami FUKUI^{*1}

KEY WORDS : environmental standards, radiation impacts, DOE, NRC, EPA, low-level radioactive waste, below regulatory concern

1. 緒 論

電力エネルギーのほぼ 30% が原子力発電により供給されている現在、累積する放射性廃棄物と人類・社会との係わりは低レベル、高レベル、TRU など放射性廃棄物の種類・性状を問わず、早急に解決されなければならない課題である。原子力産業がトイレのないマンションとたとえられたのは 20 数年以前のことである。このたとえは必ずしも正確ではないが、浄化槽もしくは汲取り式トイレで回収された廃棄物の処分場が稼働していないことに比喩されるこの現状は以前と変わっていない。

社会問題として廃棄物処分の重要性を認識している者でも「NIMBY (Not In My Back Yard) として個人のレベルでは処分の実施に反対する」とは、この 3 月に来日したカナダの VANDERGRAAF 博士 (Whiteshell 研究所) の言であり、廃棄物による漠然とした環境汚染に対する公衆の不安感是世界共通のものである。

原子力エネルギー開発の先進国である米国は、放射性廃棄物の管理や処分においても豊富な経験を有しており、その概要を検討することは、規制除外レベル¹⁾の設定を含めてわが国の今後の放射性廃棄物管理や処分戦略に資すること、および保健物理分野に環境汚染やリスク評価問題としてフィードバックされる今後の研究課題が

明らかにされることなどの点で有意義である。

筆者は本年 2 月に、米国環境保護庁 (EPA) の Office of Radiation Programs を訪問する機会を得て、低レベル放射性廃棄物 (LLW) の管理と処分に関する情報・資料²⁾を入手した。これに基づき本報では米国における LLW に関連する管理の概要 (管理体制、分類、発生源と量、処分量とサイト) などについて解説する。

2. 放射性廃棄物管理・処分の経過

放射性廃棄物の管理・処分は放射線防護方針に関係が深いので、初めにその経過を略述する。

放射線防護に関する諮問機関である ICRP (International Commission on Radiological Protection) および NCRP (National Council on Radiation Protection) は政府機関ではないため、1959 年に FRC (Federal Radiation Council) が設立された。これは放射線防護に関連するすべての政府機関への指針や基準を大統領に勧告することをおもな任務としている。FRC の指針は ICRP や NCRP の勧告に基づいているが、この機能は 1970 年に EPA に委譲された。また、EPA は 1987 年には ICRP の 1977 年勧告を取り入れ、放射線作業員の線量限度 (5 rem/y) および妊娠期間中の胎児の線量限度 (0.5 rem) を定めている。

原子力エネルギー法 (Atomic Energy Act : AEA) に定められた LLW の管理や処分に対する環境基準を制定する権限も 1970 年に AEC (Atomic Energy Commission) から EPA に委譲された。これは放射性物質

^{*1} 京都大学原子炉実験所放射線管理研究部門 ; 大阪府泉南郡熊取町 (〒590-04)

Research Division of Radiation Control, Research Reactor Institute, Kyoto University ; Kumatori-cho, Sen-nan gun, Osaka 590-04.

を取り扱う施設外の環境における一般的な線量レベル、濃度および量の制限などに関するものである。天然および加速器由来の放射性物質 (Naturally Occurring and Accelerator-produced Radioactive Materials: NARM) は AEA の規制対象外である。そこで EPA はこの NARM 廃棄物 (NARMW) の規制に毒性物質規制法 (Toxic Substances Control Act: TSCA) を適用するのが妥当であるとしているが、LLW のうち NARMW 量はわずかである。AEA により規定された LLW は、1985 年に 40 CFR 191 (Part 191 of Title 40 of the Code of Federal Regulations) に定められた使用済核燃料、高レベル放射性廃棄物 (HLW)、TRU 廃棄物およびウラン・トリウム尾鉱を除くすべての廃棄物である。これらは営利目的およびおもに軍事目的から由来する LLW に大別され、前者は NRC (Nuclear Regulatory Commission)、後者は DOE (Department of Energy) の管理管轄下にある。NRC の責務は種々の施設に対して AEA のもとで許認可を与え、それに基づいて施設の稼働などが行われていることを確認することであるが、DOE 施設については NRC 認可の管轄外であり、ALARA の実行が行われているか否かの判断も DOE の施設者側に委ねられている。NRC および DOE 管轄

の施設ともに画一的な放出基準は課せられていないが、通常は NCRP が定めた最大許容濃度基準を適用している。EPA の定めた環境基準 (公衆個人に対して 25 mrem/y: 全身, 75 mrem/y: 決定臓器) は NRC 管轄の廃棄物処分場や DOE 施設にも適用され、これを超える施設からの放射性物質の排出は禁じられている。

LLW は 1940 年代から発生したが、当初は軍事や核燃料サイクルに比べて研究所や病院からの LLW が量的にも多く、これらは海洋や AEC サイトに廃棄されていた。営利目的から発生した LLW の処分サイトとしては、1962 年に Beatty (Nevada), Maxey Flats (Kentucky), その後 10 年間に West Valley (New York), Sheffield (Illinois) および Barnwell (South Carolina) が操業された。しかし 1975 年には West Valley, 1977 年には Maxey Flats がトレンチからの漏洩のため、また 1978 年には埋設場所 (容量) の問題から Sheffield が閉鎖されている。

1973 年に NAS (National Academy of Sciences) は AEC から LLW の浅地層処分に関する研究を依頼され、そこで連邦政府が責任体制、基準設定などに関して州、地方行政機関と調整し、EPA はその責務を負う機関であることが確認された。1980 年には州内で発生し

Table 1 Current and projected cumulative quantities of LLW.^{a)}

Source of material	Year			
	1985	2000	2010	2020
ROUTINE LLW				
DOE/Defense, 10 ³ m ³				
LLW-Routine	2,181	4,043	5,159	6,256
FUSRAP LLW	119	870	870	870
SFMP LLW	24	791	800	800
Commercial, 10 ³ m ³				
LLW (No Reprocessing)	1,160	2,441	3,545	4,972
D&D LLW	—	0.6	91.3	795.9
NONROUTINE LLW				
Facility, 10 ³ m ³				
West Valley D&D	3.0	12.9	12.9	12.9
Three Mile Is. II D&D	3.5	9.3 ^{b)}	9.3	9.3
Fuel Reprocessing	—	6.7 ^{c)}		
Mixed Oxide Fuel Fabrication	—	0.5 ^{c)}		

^{a)} All figures from DOE86, except as noted.

^{b)} From NRC81b, Appendix D, Worst-Case Conditions.

^{c)} Volumes are for year of operation. The fuel reprocessing plant has a capacity of 2,000 MTHM/yr. The mixed oxide fuel fabrication plant handles 400 MTHM/yr. Volumes are from NRC86.

た LLW はそこで処分すべき責任があるとした法律 96-573 (LLRWPA) が議会で通過したが、1986 年に修正され (Public Law 99-240), 1993 年まで猶予期間が与えられている。またこの法律は規制懸念以下 (Below Regulatory Concern : BRC) という概念を初めて保証した。そして NRC が管轄する LLW のうち、除外することのできる廃棄物を同定する手順を確立するよう定めている。

EPA は以上のような LLW の処分に関連して、放射性物質によるインパクト評価を行うためのモデルを 1984 年に開発した (PRESTO-EPA)。以下にはその評価対象となる被曝源としての LLW, NARMW および BRC 廃棄物 (BRCW) の実情および発生量の予測値について言及する。

Table 2 Characterization of the AEA and selected NARM waste streams.

Waste stream	10 CFR 61 waste class	As-generated waste form ^{a)}	Optional waste forms ^{b)}	Description of the waste stream
L-IXRESIN	B	AW	SW, IS, HIC	Dewatered Resin in Drum
L-CONCLIQ	A	AW	SW, —, HIC	Absorbed Liquid in Drum
L-FSLUDGE	B	AW	SW, IS, HIC	Dewatered Sludge in Drum
P-FCARTRG	A	TR	SW, —, HIC	Filter in Drum
L-DECONRS	C	AW	SW, IS, HIC	Dewatered Resin in Drum
L-NFRCOMP	A	AW	SW, —, HIC	Activated Steel in Drum or Cask
F-PROCESS	A	AW	SW, —, HIC	Limestone, Oxides in Drum
U-PROCESS	A	AW	SW, —, HIC	Bed Materials <i>etc.</i> in Drum
L-COTRASH	A	TR	SW, IS, HIC	Compactible Trash (Paper, Plastics, <i>etc.</i>)
L-NCTRASH	A	TR	SW, —, HIC	Non-Compactible Trash (Equipment, Used Tools, Parts)
F-COTRASH	A	TR	SW, IS, HIC	Compactible Trash
F-NCTRASH	A	TR	SW, —, HIC	Non-Compactible Trash
I-COTRASH	A	TR	SW, IS, HIC	Compactible Trash
N-LOTRASH	A	TR	SW, IS, HIC	Mostly Compactible Trash
N-SSTRASH	A	TR	SW, IS, HIC	Compactible Trash Puls Miscellaneous Non-Compactible
N-SSWASTE	A	TR	SW, —, HIC	MgF ₂ Slag, U Cuttings, Scraps, Used Equipment
I-LQSCNVL	A	AW	SW, IS, HIC	Absorbed Scintillation Fluids in Drum
I-ABSLIQD	A	AW	SW, —, HIC	Absorbed Aqueous Fluids in Drum
I-BIOWAST	A	AW	SW, IS, HIC	Biological Wastes with Absorbent in Drum
N-LOWASTE	A	AW	SW, IS, HIC	Fluids, Biowastes with Absorbent in Drum
N-ISOPROD	C	TR	SW, —, HIC	Compactible Trash Plus Miscellaneous Solid Items
N-SOURCES	C	AW	SW, —, HIC	Encapsulated Sources in Drum
N-TRITIUM	B	TR	SW, —, HIC	Trash, Metal Items in Drum
N-TARGETS	B	AM	SW, —, HIC	Spent Targets (Foil) in Drum
R-RAIXRSN	(C)	AW	SW, IS, HIC	Dewatered Resin in Drum
R-RASOURC	(C)	AM	SW, —, HIC	Encapsulated Ra Sources in Drum

^{a)} AW : Absorbing Waste, AM : Activated Metal, TR : Trash

^{b)} SW : Solidified Waste, IS : Incinerated/Solidified Waste, HIC : High Integrity Container

3. LLW, NARMW および BRCW の種類および発生量

3.1 LLW および NARMW

DOE は管理する LLW を 6 群 [①ウラン/トリウム, ②FP, ③誘導放射能, ④トリチウム, ⑤ α 核種もしくは TRU (<100 nCi/g), ⑥その他] に分類している。

NRC は当初 37 群に分類していたが, TMI 関連など不定期に発生したものを含めて現在では 148 群に分類している。

Table 1³⁾ には 1985 年までに発生した LLW の総量および 2020 年までの予測累積 LLW 総量が示されている。これによれば DOE 軍事関連施設および NRC が管轄する施設から定期的に発生する LLW の量が最も多い。表中の FUSRAP および SFMP はウラン/トリウム取扱施設改修および閉鎖に伴う LLW, D&D は除洗と解体に伴う LLW であることを示している。

EPA は **Table 1** に示した AEA 関連の LLW に, 前述した NARM や BRC 廃棄物を加えて分類し, リスク評価のソースタームとしている。**Table 2** にはまだ基準が確定されていない BRCW を除く LLW および NARMW の分類された廃棄物群ごとの内容, 性状などが示されている。左端は群の略号であり, L, P, U, I, N, R はそれぞれ, Light water reactor, Pressurized water reactor, Fuel fabrication, Uranium conversion, Institutional, Industrial, Radium を意味している。これら発電所や燃料サイクル施設から発生する LLW の発生源や内容物については, **Table 2** の右端の表示から推定できるので詳しくは言及しない。最下段 2 行に掲げられている AEA に規制されない NARMW には, 粒子加速器関連, 0.05 (wt%) 以下のウラン, トリウムを含む物質, 医療関連など 70 の廃棄物群から, EPA が発生量, 半減期および比放射能の観点からリスク評価の対象とした二つの群のみが掲げられている。医療に用いられているラジウム線源廃棄物 (R-RASOUC) 濃度は, 上水のラジウム浄化などに用いられる樹脂廃棄物 (R-RAIXRSN) の濃度 (10^{-2} Ci/m³ オーダ) に比べれば高い (10^3 Ci/m³ オーダ) が, 発生量は今後 20 年で 10^3 m³ オーダと **Table 1** に掲げた AEA の規制下にある LLW に比べれば 3 桁以上少ない。**Table 2** に示された廃棄物等級 A~C は, 処理・処分法により 10 CFR 61 の中で NRC が LLW に課した分類であり, A は発生したものを梱包すること, B と C は固化により安定化する必要がある廃棄物, C は処分に際して 5 m 以上の被覆もしくは 500 年間は廃棄物が錯乱されない障壁を設けることとされている。

NARMW では ²²⁶Ra と ²¹⁰Po および ²¹⁰Pb までの娘核種, LLW では **Table 3**⁴⁾ に示した半減期 1 年以上の放射性核種が EPA による廃棄物処分に伴うリスク評価対象核種とされている。この評価では LLW を対象としているにもかかわらず, 評価期間を 1 万年としている。

3.2 BRCW

規制懸念以下とする濃度基準は前述したように NRC で検討中であるが, EPA は NRC, AIF (Atomic Industrial Forum) および EEI (Edison Electric Institute) などの調査に基づいて, BRCW となることが想定

Table 3 Radionuclides considered in the EPA source term for LLW regulated under the AEA (Gr86).

Nuclide	Decay constant (yr ⁻¹)	Half-life (yr)
Hydrogen-3	5.64 E-02	1.23 E+01
Carbon-14	1.21 E-04	5.73 E+03
Iron-55	2.57 E-01	2.60 E+00
Nickel-59	8.66 E-06	8.00 E+04
Cobalt-60	1.32 E-01	5.26 E+00
Nickel-63	7.53 E-03	9.20 E+01
Strontium-90	2.42 E-02	2.81 E+01
Niobium-94	3.47 E-05	9.59 E-02
Technetium-99	3.25 E-06	2.12 E+05
Ruthenium-106	6.89 E-01	1.00 E+00
Antimony-125	2.50 E-01	2.70 E+00
Iodine-129	4.08 E-08	1.70 E+07
Cesium-134	3.36 E-01	2.05 E+00
Cesium-135	2.30 E-07	3.00 E+06
Cesium-137	2.31 E-02	3.00 E+01
Barium-137m	1.43 E+05	4.80 E-06
Europium-154	8.15 E-02	1.60 E+01
Uranium-234	2.83 E-06	2.47 E+05
Uranium-235	9.85 E-10	7.1 E+08
Neptunium-237	3.30 E-07	2.14 E+09
Uranium-238	1.55 E-10	4.51 E+09
Plutonium-238	7.90 E-03	8.6 E+01
Plutonium-239	2.87 E-05	2.44 E+04
Plutonium-241	5.25 E-02	1.32 E+01
Americium-241	1.51 E-03	4.58 E+02
Plutonium-242	1.83 E-06	3.79 E+05
Americium-243	9.40 E-05	7.95 E+03
Curium-243	2.17 E-02	3.2 E+01
Curium-244	3.94 E-02	1.76 E+01

Table 4 Surrogate waste streams for BRC analysis.

Waste stream	Identification
<u>Nuclear Fuel-Cycle Sources</u>	
B-COTRASH	BWR Compactible Trash
P-COTRASH	PWR Compactible Trash
P-CONDRSN	PWR Condensate Resins
L-WASTOIL	LWR Waste Oils
F-NCTRASH	Fuel Fabrication Noncompactible Trash
F-COTRASH	Fuel Fabrication Compactible Trash
F-PROCESS	Fuel Fabrication Process Waste
U-PROCESS	Uranium Hexafluoride Process Waste
<u>Industrial Sources</u>	
N-SSWASTE	Source and Special Nuclear Material Waste
N-SSTRASH	Source and Special Nuclear Material Trash
N-LOWASTE	Low Activity Waste
N-LOTTRASH	Low Activity Trash
<u>Institutional Sources</u>	
I-LQSCNVL	Liquid Scintillation Vial Wastes
I-BIOWAST	Animal Carcasses, Tissues, and Excreta
I-ABSLIQD	Absorbed Liquid Wastes
I-COTRASH	Compactible Trash
<u>Consumer Products Sources</u>	
C-SMOKDET	Residential Smoke Detectors (Using Am-241)
C-TIMEPCS	Radioluminous Timepieces (Using Tritium)
<u>Special Reference Waste Source</u>	
BIOMED	NRC deregulated liquid scintillation media and animal carcasses
BWR : Boiling Water Reactor	
PWR : Pressurized Water Reactor	
LWR : Light Water Reactor (<i>i.e.</i> , representative of both BWRs and PWRs)	

される廃棄物 (Surrogate BRC) を 19 群に分類した (Table 4)。

放射性物質を含む消費材のうち、おもな物品は煙探知器 (^{241}Am) および時計 (トリチウム) である。これらの製造は NRC により認可を受けているが、廃棄はまったく規制されていない。したがって、BRCW 処分のリスク評価には格好の対象となる。Table 4 の下段に BIOMED と分類されている廃棄物群は現実に NRC が規制対象外としている唯一の廃棄物であり、この基準は $0.05 \mu\text{Ci/g}$ 以下の ^{14}C および ^3H を含む液体シンチレーションバイアルや生物廃棄物である。これは年間にほぼ $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 発生する。

EPA が BRCW のリスク評価に用いるために、Table 4 に掲げた廃棄物群ごとに調査した対象核種と濃度を

Table 5⁴⁾ に掲げる。これによれば半減期が数十年以上である ^{137}Cs や ^{90}Sr の BRCW 中濃度が 10^{-3} Ci/m^3 オーダであること、群別した廃棄物ごとの総放射能濃度が 10^{-1} Ci/m^3 オーダであることおよび LLW 中にも存在したが、BRCW 中にも TRU 核種が含まれていることなどの特徴がある。

4. 米国における LLW 処分場の実態

4.1 LLW 処分場

HLW 処分場は DOE により建設されるが、LLW 処分場は DOE の管轄下にある 17 サイトおよび NRC により営利運営されている 6 サイトの合計 23 サイトがある。その一覧を Table 6 に示す。これによれば DOE 施設のうち 6 サイト (HANF, INEL, LASL, NTS, ORNL, SRP) がおもな処分場であり、残りの 11 サイ

Table 5 Radionuclide concentrations of surrogate BRC waste streams (Gr86) (Ci/m³).

Nuclide	Waste stream								
	B-COTRASH	P-COTRASH	P-CONDRSN	L-WASTOIL	F-PROCESS	F-COTRASH	F-NCTRASH	U-PROCESS	N-SSWASTE
H-3	5.67E-05	7.32E-04	1.60E-06						
C-14	3.50E-06	2.70E-05	5.84E-08						
Fe-55	5.03E-03	1.44E-02	1.92E-05						
Ni-59	5.21E-06	1.72E-05	1.68E-08						
Co-60	8.47E-03	2.78E-02	2.76E-05	5.50E-05					
Ni-63	1.14E-04	5.29E-03	5.17E-06						
Sr-90	1.06E-05	5.34E-05	1.56E-07						
Nb-94	1.64E-07	5.45E-07	4.25E-10						
Tc-99	2.25E-07	2.28E-07	5.16E-11						
Ru-106	5.99E-06	6.04E-06	8.16E-08						
Sb-125	6.78E-05	2.22E-04	2.17E-07						
I-29	5.99E-07	6.73E-07	1.52E-10						
Cs-134	5.99E-03	6.04E-03	2.88E-04						
Cs-135	2.25E-07	2.28E-07	1.06E-08						
Cs-137	5.99E-03	6.04E-03	2.76E-04	5.30E-06					
Ba-137m	5.99E-03	6.04E-03	2.76E-04	5.30E-06					
Eu-154	6.79E-06	2.23E-05	2.92E-09						
U-234	2.74E-08	5.12E-07	7.86E-09		5.20E-04	2.68E-05	2.56E-05	3.64E-04	4.97E-05
U-235	4.41E-10	8.22E-09	3.79E-11		2.30E-05	1.18E-06	1.13E-06	1.65E-05	2.77E-06
Np-237	1.97E-13	3.67E-12	7.28E-15						
U-238	8.04E-09	1.50E-07	2.99E-10		8.54E-05	4.40E-06	4.20E-04	3.64E-04	1.71E-04
Pu-238	1.92E-06	1.44E-05	2.09E-08						
Pu-239	9.72E-07	1.34E-05	7.32E-09						
Pu-241	4.72E-05	5.82E-04	6.38E-07						
Am-241	8.11E-07	9.56E-06	1.50E-08						
Pu-242	2.12E-09	2.92E-08	3.20E-11						
Am-243	5.47E-08	6.47E-09	1.01E-09						
Cm-243	1.62E-09	6.63E-09	7.98E-12						
Cm-244	1.26E-06	6.31E-06	1.11E-08						
Total	3.18E-02	6.73E-02	8.95E-04	6.56E-05	6.28E-04	3.24E-05	3.09E-05	7.45E-04	2.23E-04

Nuclide	Waste stream									
	N-SSTRASH	N-LOWASTE	N-LOTTRASH	I-COTRASH	I-LQSCNVL	I-ABSLIQD	I-BIOWAST	C-SMOKDET	C-TIMEPCS	BIOMED
H-3		1.63E-02	2.85E-02	9.13E-02	5.01E-03	1.42E-01	1.75E-01		3.62E+01	4.45E-02
C-14		9.63E-04	1.64E-03	5.26E-03	2.51E-04	8.16E-03	1.01E-02			4.45E-02
Fe-55										
Ni-59										
Co-60		1.47E-03	3.25E-03	1.04E-02		3.12E-02	3.99E-03			
Ni-63										
Sr-90		1.31E-03	4.53E-04	1.45E-03	4.34E-03	4.34E-03	8.33E-03			
Nb-94										
Tc-99		7.76E-10	1.06E-09	3.39E-09		1.02E-08	6.51E-09			
Ru-106										
Sb-125										
I-129										
Cs-134										
Cs-135										
Cs-137		1.04E-03	1.42E-03	4.56E-03		1.37E-02	8.76E-03			
Ba-137m		1.04E-03	1.42E-03	4.56E-03		1.73E-02	8.76E-03			
Eu-154										
U-234										
U-235	2.56E-06									
U-235	1.42E-07									
Np-237										
U-238	8.80E-06									
Pu-238										
Pu-239										
Pu-241										
Am-241		1.51E-06	4.82E-06					2.17E-03		
Pu-242										
Am-243										
Om-243										
Om-244										
Total	1.15E-05	2.21E-02	3.67E-02	1.18E-01	9.60E-03	2.13E-01	2.15E-01	2.17E-03	3.62E+01	

Table 6 Existing shallow-land LLW disposal sites.

Name	Abbreviation	Location
DOE/defense		
Brookhaven National Laboratory ^{b)}	BNL	Upton, New York
Hanford Reservation ^{a)}	HANF	Richland Washington
Idaho National Engineering Laboratory ^{a)}	INEL	Idaho Falls, Idaho
Lawrence Livermore National Laboratory	LLNL	Livermore, California
Los Alamos National Laboratory ^{a)}	LASL	Los Alamos, New Mexico
National Lead of Ohio	NLO	Fernauld, Ohio
Nevada Test Site ^{a)}	NTS	Mercury, Nevada
Niagara Falls	NIGF	Niagara Falls, New York
Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant	ORGDP	Oak Ridge, Tennessee
Oak Ridge National Laboratory ^{a)}	ORNL	Oak Ridge, Tennessee
Oak Ridge Y12 Plant	Y12	Oak Ridge, Tennessee
Paducah Gaseous Diffusion Plant	PAD	Paducah, Kentucky
Pantex Plant	PANT	Amarillo, Texas
Portsmouth Gaseous Diffusion Plant	PORT	Portsmouth, Ohio
Sandia National Laboratories	SAND	Albuquerque, New Mexico
Savannah River Plant ^{a)}	SRP	Aiken, South Carolina
Weldon Springs Quarry	WSPG	Weldon Spring, Missouri
Commercial		
Barnwell	BARN	Barnwell, South Carolina
Beatty	BETY	Beatty, Nevada
Maxey Flats ^{b)}	MFKY	Maxey Flats, Kentucky
Richland	RICH	Richland, Washington
Sheffield ^{b)}	SHEF	Sheffield, Illinois
West Valley ^{b)}	WVNY	West Valley, New York

^{a)} Major DOE disposal facilities.

^{b)} Facility closed.

トはウラン・トリウム廃棄物や各サイトから発生した少量の LLW のための処分場である。また DOE の BNL および NRC 管轄下の 3 サイト (MEKY, SHEF, WVNY) は現在閉鎖されている。

Table 7^{a)}~^{c)}にはおもな DOE の処分場 6 サイトおよび NRC 6 サイトの規模 (サイト面積, そのうちの処分場として利用可能な面積, 処分可能密度: m^3/ha および 1982 年までに使用した面積) を掲げる。これによれば, これら処分場の総サイト面積は約 10^3 ha , そのうちの約 3 割が実際の処分場として利用可能であること, またこの利用可能面積の約 6 割が 1982 年までにすでに使用済であることなどがわかる。

4.2 LLW の廃棄量

■ 前述した DOE のおもな 6 サイトには, サイト当たり毎

年数千 m^3 (ORNL) から数万 m^3 (SRP) の範囲で LLW が処分されており, 1985 年までのサイト当りの累積総処分量は $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ (INEL) から $4.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ (HANF) の範囲内である。そして毎年, DOE 17 サイトに処分される総量が 1985 年には $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ と 10 年前の約 2 倍に増加している。1985 年までの DOE 17 サイトの累積処分量が $2.18 \times 10^6 \text{ m}^3$ であることは Table 1 に示されている。Table 6 に掲げた NRC 管轄下の 6 サイトでの毎年の処分量も着実に増加し, 1985 年 ($7.7 \times 10^4 \text{ m}^3$) は 20 年前のほぼ 5 倍になっている。1985 年までのサイトごとの累積処分量は $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ (WVNY) から $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ (BARN) の範囲にある。NRC 6 サイトの 1985 年までの累積処分量が $1.16 \times 10^6 \text{ m}^3$ であることも Table 1 に示されている。

Table 7 Status of major LLW disposal sites.

Site	Site size ^{a)} (ha)	Estimated total usable burial area ^{a)} (ha)	Calculated land usage factor ^{a)} (m ³ /ha)	Estimated burial area utilized through 1982 (ha) ^{b)}
DOE/defense				
Los Alamos National Laboratory, New Mexico	36.4	24.7	29,490	15.5
Idaho National Engineering Laboratory, Idaho	35.6	31.6	20,000	26.4 ^{c)}
Nevada Test Site, Nevada	42.5			
Oak Ridge National Laboratory, Tennessee	27.5	5.8 ^{d)}	6,580 ^{d)}	3.4 ^{d)}
Hanford Reservation, Washington	>405		4,767	25.9
Savannah River Plant, South Carolina	78.8	72.7	11,150	50.3
Total	>626	>135		121.5
Commercial				
West Valley, New York (Closed March 11, 1975)	8.9	<8.9	22,470	3.0
Maxey Flats, Kentucky (Closed December 27, 1977)	102	<51	8,820	10.0
Sheffield, Illinois (Closed April 8, 1978)	8.9	3.9	22,650	3.9
Barnwell, South Carolina	97.1	46.7	19,550	20.3
Beatty, Nevada	32	18.6	8,132	11.6
Richland, Washington	40	35.4	8,714	16.2
Total	289	182		65.0
Grand Total	>915	>317		186.5

^{a)} Calculated from data given in Ga79 (for DOE) and Ho80b (for commercial), except for Barnwell (La80).

^{b)} Calculated by dividing volume added in 1982 by the average land usage factor to obtain area used in 1982. This value was added to the 1981 value reported in DOE82a.

^{c)} In addition, prior to 1970, about 2 ha was used for TRU waste, which was considered to be LLW at the time of burial.

^{d)} This pertains to the radioactive waste management site in Area 5 of the Nevada Test Site. The availability of land that could be used for shallow-land burial is not clearly defined because of the classified nature of the site and the abundance of land. A land usage factor is not applicable at NTS.

Fig. 1³⁾には上述した DOE および NRC 管轄下のサイトごとの LLW 累積処分量比率を示す(サイトの略号は Table 6 参照)。DOE のおもな 6 サイトにおける 1985 年までの LLW 累積処分量は、前述した他の 11 サイト合計の約 3 倍であるが、3.1 に述べた区分①を除く②～⑥までの処分放射能の総量はおもな 6 サイトで 99% 以上を占めている。ウラン・トリウム廃棄物①は 6 サイトの合計 (1.86×10^6 kg) が 11 サイト (2.40×10^7 kg) より少ない。DOE のおもな 6 サイトにおける 1985 年までの区分②～⑥の総処分量の内訳は、誘導放射性核種

(1.26×10^7 Ci)、トリチウム (1.20×10^7 Ci) および核分裂生成物 (9.42×10^6 Ci) の合計が 97% を占め(半減期補正はされていない)、 α 廃棄物 (<10 nCi/g) は 6.22×10^4 Ci、その他の廃棄物は 9.00×10^5 Ci となっている³⁾。

4.3 処分後の問題点

処分実施の初期には、簡便で経済的な浅地層処分法が行われたが、これは当初期待されたほどには放射性核種を効果的に地中に隔離できなかった。WYNY では 1975 年にトリチウムと ⁹⁰Sr を含む水がトレンチの蓋から浸

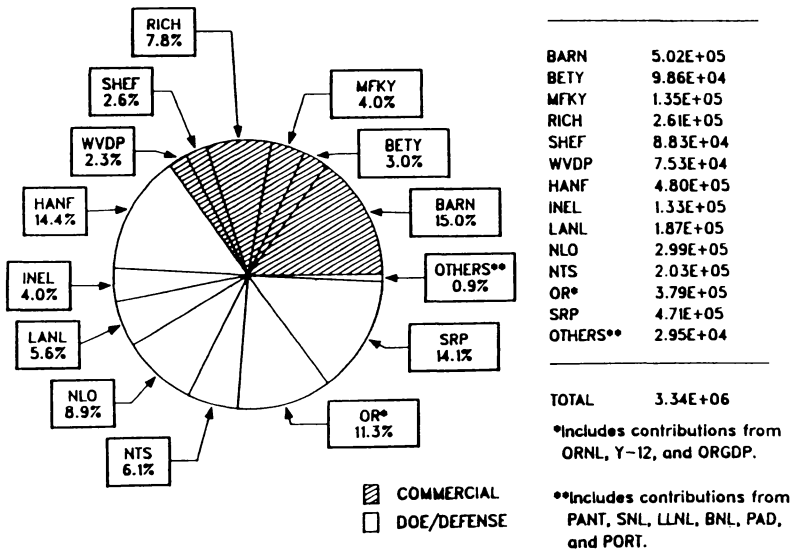


Fig. 1 Total volume of buried LLW through 1985 (DOE 86).

出し、1977年にはMFKYでもトレンチから放射性核種が浸出したことから閉鎖された。これらの地域は比較的、年間降雨量が多いうえに土壌の透水性が低く、降雨強度が大きい場合にはバスタブ効果（トレンチ内の地下水位が上昇して地表に浸出する）により、地表が広範囲に汚染されたものである⁹⁾。ORNLやBARNでは地下水やその一部が地表水となって近くの河川に流入することも知られている¹⁰⁾。またHANFでは多くの地下水汚染の例が処分法と関連させて調査されている。WVNYでは³Hや¹⁴Cがガス状でトレンチから地表に上昇する経路が知られている¹¹⁾。おなじ現象はラドンでも問題になる。他にも地表の風化やトレンチ地層の不連続性などにより汚染の拡大する可能性が指摘されている。

以上のLLWのインベントリ、処分場などに続いて、以下には過去および計画段階を含めた処分方式を概説する。

5. LLWの処分法

5.1 衛生埋設法 (Sanitary landfill: SLF)

SLFは現在では毒性物質を含んでいない生活廃棄物の処分として確立されている方法である(40 CFR 241~257)が、EPAは将来、BRCWの処分にこの方法を適用することを想定してインパクト評価を行っている。この埋設法は最も簡便であり、1日の埋めたて廃棄物ごとに15cmの土壌を被覆し、この層厚を1.8m程度に制限する。そしてこの最上層には0.6mの土壌を被覆する。この方法では廃棄物層を地下には完全に埋め込まな

い。

5.2 簡易浅地層処分 (Conventional Shallow-Land Disposal: SLD)

SLDは1963年から1982年にわたって、BARN、BETY、WVNYなどで実際のLLW処分に用いられた。代表的なトレンチの規模は180m×30m、深さ7mであり、下部5mにLLWを処分して、その上部に中心で約3m、端で2mとなる程度に掘削した土壌を埋め戻す。この埋め戻し材はとくに圧縮されず、表面は短根草が植えられる。トレンチの間隔は3m程度である。

5.3 改良浅地層処分 (Improved Shallow-Land Disposal: ISD)

SLDは前述した廃棄物の等級A、Bクラスに適用されたが、クラスCにはISDのシルトトレンチが用いられる。これは20m×3m、深さ8mであり、LLWは下部7mに処分され、その上部1mは被覆、さらに1mの蓋をする。また外部からの侵入を防止するために粘土、砂、砂利などでトレンチの蓋の上に高さ5.5mの障壁が設けられる。

5.4 10 CFR 61 処分法

これはNRCが処分場に対して10 CFR 61により認可している方法であり、前述したSLDとISDを組み合わせたものである。トレンチの間隔は3mであるが、クラスAとBの間は緩衝域として30mの間隔が設けられる。また、埋め戻し材や蓋は、振動圧縮機で締め固め

られる。

5.5 中深度処分 (Intermediate Depth Disposal : IDD)

これもクラスCの処分に適合するように設計されたトレンチである。その規模は $180\text{ m} \times 30\text{ m}$ 、深さ 15 m であり、下部 6 m に LLW が廃棄され、その上部 9 m を埋め戻す。さらに SLD と同様に中心で 1 m 高さとなるように被覆される。この場合も振動圧縮機が締め固めに用いられる。この処分法では底部を傾斜させて砂利の排水路を設けている。

5.6 盛土コンクリートバンカ法 (Earth-Mounded Concrete Bankers : EMCB)

EMCB 法はフランスで開発された方法である。これはトレンチを掘削して、その底部にコンクリートが打設され、排水路によりトレンチ内の浸透水が集水できる構造になっている。その規模は $180\text{ m} \times 30\text{ m}$ 、深さ 8 m である。ここには厚さ 76 cm 、 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ の鉄筋コンクリート製容器をクラスBおよびCの LLW に用い、その上部にクラスAおよび低放射能のクラスBの LLW が円柱容器に入れられて積み上げられ、その上部が 2 m ほど盛土される。

5.7 コンクリート容器 (Concrete Canister : CC) 処分方式

これは Westinghouse 社で最近開発された $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 、高さ 1.8 m の六角柱体 (SUREPAKC) に、種類の廃棄物容器を納め、この単体をトレンチ ($154\text{ m} \times 37\text{ m}$ 、深さ 7.8 m) に処分するものである。ここには $4,100$ 本の SUREPAK 単体が廃棄されるが、この方式の特色は LLW であるにもかかわらず将来の回収も予想した処分方式を採用している。この上部は、砂、粘土、砂利などにより 5 層、 4.3 m 厚さの被覆が行われ、トレンチ内の浸透水も揚水される構造になっている。

5.8 その他

低レベル液体廃棄物の処分には深井戸注入 (Deep-Well Injection : DWI) 法および亀裂層 (Hydrofracture : HF) 法がある。これらの方法は、処分敷地が十分でないわが国では適切なものとは考えられないので簡単に解説する。

DWI は過去に多く行われており、不透水層下部の透水層 ($300 \sim 3,000\text{ m}$) に放射性液体を注入する方法であるが、廃液の拡散状況予測が困難であることから、処分敷地の確保と鉱物所有権に問題があるとされている。

HF 処分は ORNL や WVNY で行われた。これは廃液を樹脂やセメントと混合してスラリーとし、頁岩のような岩体の亀裂に注入する方法であり、処分後に廃液が不

動化される特色を有する。

以上の廃液は比較的高い放射能濃度 (たとえば ORNL では 270 Ci/m^3) の LLW であり、液体以外にも同様の LLW に対しては深地層処分 (Deep Geological Disposal : DGD) が考えられている。これは不透水岩盤を有する鉱山の廃坑道 ($30 \sim 1,000\text{ m}$) を利用するものである。

6. 結 語

本報では主として米国における低レベル放射性廃棄物の管理と管轄、種類、発生量、処分サイトおよび処分法などについて解説した。米国では放射性物質だけではなく、有機溶剤や重金属との複合汚染も生じており、EPA (Waste Management Standards Branch) の F.L. GALPIN 氏によれば、この汚染土壌対策が莫大な費用を要することから経済学者も含めて Cost Benefit 解析が検討されているとのことである。わが国でも LLW 処分計画が進行中であるが、処分を実施している諸外国の環境汚染やインパクト評価法^{12,13)}などを、より詳細に検討して計画に反映されることを望むとともに、ここに保健物理の果す大きな社会的使命がある。本報がわが国の関連研究者にわずかでも参考になれば幸甚である。

最後に、資料を送付いただいた EPA (Bioeffects Analysis Branch) の J.S. PUSKIN 氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉田芳和; 放射性廃棄物の規制除外に関する海外およびわが国における検討状況, *Isotope News*, No. 410, 16 (1988).
- 2) USEPA; Low-level and NARM radioactive wastes, Office of Radiation Programs, Draft Report, Washington, D.C. (1988).
- 3) USDOE; Spent fuel and radioactive waste inventories, projections and characteristics, DOE/RW-0006, Rev. 2 (1986).
- 4) J.M. GRUHLKE; EPA source term for low-level radioactive waste risk assessment, Office of radiation programs, Draft Report, Washington, D.C. (1986).
- 5) P.M. GARRETT; An evaluation of low-level radioactive burial ground capacities at the major DOE reservations, ORNL/NFW-79/17 (1979).
- 6) W.F. HOLCOMB; Inventory of shallow land disposal of radioactive wastes at commercial

- sites (1962-1979), EPA-ORP/TAD-80-6 (1980).
- 7) D.E. LARGE, J.E. VATH and L.E. STRATTON; Barnwell, South Carolina, Radioactive Waste Disposal Site, Trip Report (1980).
- 8) USDOE; Spent Fuel and Radioactive Waste Inventries, Projections, and Characteristics, DOE/NE-0017/2 (1983).
- 9) G.L. MEYER; "Problems and Issues in the Ground Disposal of Low-Level Radioactive Waster, 1977, Management of Low-Level Radioactive Waste," Pergamon Press, New York (1979).
- 10) T.W. OAKES and K.E. SHANK; A review of environmental surveillance data around low-level waste disposal areas at Oak Ridge National Laboratory, Proc. of Health Physics Society Twelfth Midyear Topical Symposium, EPA Report 520/3-79-002 (1979).
- 11) J.M. MATUSZEK, L. HUSAIN, A.H. LU, J.F. DAVIS, R.H. FAKUNDINY and J.W. PFERD; "Application of Radionuclide Pathway Studies to Management of Shallow Low-Level Radioactive Waste Burial Facilities, Management of Low-Level Radioactive Waste," Pergamon Press, New York (1979).
- 12) 福井正美; カナダにおける核廃棄物処分研究, 日本原子力学会誌, **26**, 8 (1984).
- 13) 福井正美; 地質媒体中における放射性核種の吸着・移動モデル, 同上, **29**, 498 (1987).