

最終廢棄物의 內容과 處理

—安定元素, 放射性核種 및 超우라늄元素를 中心으로—

1. 序 言

核分裂에 의해 직접 생기는 핵種은 극히 짧은 半減期의 것을 제외하면 144개 정도로 全重量의 약 27%가 放射性이다. 分裂核種外에도 중성자의 吸收反應에 의한 誘導放射能이라든가 核三分裂에 의한 것이 더해진 3T , ^{14}C 등이 생긴다. 또 使用後核燃料에는 超우라늄元素가 생긴다. 原子爐 構造體에 생기는 放射化現象에 따르는 것이라든가 燃料被覆의 外에서 나타나는 유도방사능 등에 대해서는 여기서 언급하지 않기로 한다.

加壓水型原子爐를 濃縮度 3.1%의 燃料로서 40,000 MWD/UT로 燃燒시켰을 경우 1,000kg의 우라늄은 최종적으로 어떻게 될까. 한 예를 보면, ^{235}U (^{234}U 가 ^{235}U 로 되어 연소된 것을 포함한다)와 ^{238}U 이 Pu化해서 연소한 것의 합계가 41.43kg, ^{235}U 가 ^{236}U 이 되어 쓸 수 없게 된 양이 4.13kg, 超우라늄 元素로 不燃性의 것이 약간 생긴다. 당초의 裝荷量 1,000kg에 대해서 위의 소비는 5%미만이다.

1億KWe의 常時運轉에 위의 보기를 예로든다면 熱效率을 34%로 하고 40,000MWD/UT의 연소를 2,684組 준비하면 된다. 裝荷燃料 U2,700 ton, 正味消費量은 130 ton, 再處理 등의 손실을 고려하더라도 150ton 정도일 것이다.

1億KWe를 모두 석탄 화력으로 충당한다면 연간 약 4억톤의 석탄이 필요하다. 이때 가끔 말썽이 되는 環境汚染 문제의 하나에 석탄에

U, Th가 포함되어 있다는 것이다. 産炭地에 따라서 다소 다르나, U이 1ppm 포함되어 있으면 연간 400톤 정도가 석탄 연소와 함께 버려지게 된다. 이것의 80%가 회수된다면 原子力 1億KWe, 2년분의 正味消費燃料에 상당한다. 물론, 그 대로 경수로에서 사용되는 것은 아니나 자원이 없는 우리나라로서는 고려할 여지가 있다.

또한 소비했다고는 하지만, 고작 1/1,000의 質量만이 에너지로 바뀌고 그대로 남아 있는 것, 이것을 폐기물이라 해도 좋을지. 이 속에는 Technetium과 같이 자연에는 없는 것도 있고 白金屬 등 귀중한 것도 많아 적극적으로 이용할 방도는 없는지.

여기서는 최근에 와서 자신이 생긴 輕水爐를 염두에 두고서 기술하기로 한다.

2. 輕水爐의 使用後核燃料

熱效率 34%로 하고 1億KWe를 發電했을 경우, 1년간 핵분열에 의해서 생긴 것을 概算해 보면 약 120톤이 된다. 그 내역은 분열해서 생기는 安定元素의 生成量 kg/年과 放射性核種에 대해서 당시의 Ci數 Cp 및 그 중량, Gc(kg)를 表1 (A) 및 (B)에 표시했다.

安定元素 합계는 86톤, 나머지가 방사성핵종이다. 이때 방사성핵종의 全發熱量은 32만KW 남짓이고, 稀가스를 제외한다면 31만KW 정도이다. 또한 表1에는 극히 짧은 半減期의 것을 제외하고 있다. 表1 (B)의 Cm(Ci)는 매년 Cp

〈表 1〉 1億kWe常時發電했을 때, 1年間に 생기는 핵分裂成分

(A) 安定元素

元 素	生成量(kg/年)	元 素	生成量(kg/年)
31 Ga	2.74 -3	51 Sb	17.571
32 Ge	1.481	52 Te	1,394.589
33 As	0.435	53 I	76.596
34 Se	193.861	54 Xe	14,020.672
35 Br	95.460	55 Cs	4,394.019
36 Kr	1,468.396	56 Ba	4,743.752
37 Rb	440.904	57 La	4,374.067
38 Sr	1,577.916	58 Ce	4,340.334
39 Y	2,139.115	59 Pr	4,057.342
40 Zr	11,427.405	60 Nd	10,828.065
41 Nb	1.62 -4	61 Pm	
42 Mo	11,728.783	62 Sm	256.834
43 Tc		63 Eu	125.027
44 Ru	5,592.927	64 Gd	22.060
45 Rh	1,543.500	65 Tb	0.7853
46 Pd	762.238	66 Dy	9.124 -2
47 Ag	93.044	67 Ho	9.515 -4
48 Cd	30.357	68 Er	7.642 -4
49 In		69 Tm	2.36 -5
50 Sn	43.957	70 Yb	1.73 -6

(B) 放射性核種

元 素	發 生 量		
	Cp(Ci)	Gc(kg)	Cm(Ci)
36 Kr-85	4.263 +7	108.684	6.815 +8
37 Rb-86	6.868 +3	0.0001	6.868 +3
-87	9.640 -2	1,096.516	○9.640 +1
38 Sr-89	4.135 +9	142.326	4.163 +9
-90	3.477 +8	2,537.140	1.479 +10
39 Y-91	5.038 +9	205.761	5.106 +9
40 Zr-93	1.186 +4	2,928.139	○1.186 +7
-95	5.509 +9	262.543	5.627 +9
41 Nb-93m	9.244 +2	0.003	1.647 +4
-95	5.509 +9	140.683	5.513 +9
43 Tc-99	5.058 +4	2,978.383	○5.058 +7
44 Ru-103	2.582 +9	80.658	2.586 +9
-106	2.955 +8	88.530	5.956 +8
46 Pd-107	3.872 +2	752.586	○3.872 +5
48 Cd-113m	2.217 +4	0.102	4.782 +5
-113	2.339 -9	6.649	○2.339 -6
49 In-115	3.666 -8	5.892	○3.666 -5
50 Sn-119m	1.223 +5	0.027	1.899 +5
-121m	1.319 +2	0.002	9.584 +3
-126	9.988 +2	35.180	○9.988 +5
51 Sb-125	1.331 +7	12.694	5.935 +7

-127	1.038 +8	0.384	1.038 +8
52 Te-125m	5.617 +6	0.312	5.689 +6
-127	1.038 +8	0.040	1.038 +8
-129m	1.006 +8	3.319	1.006 +8
53 I-129	7.831 +1	448.432	○7.831 +4
-131	2.448 +9	19.748	2.448 +9
54 Xe-131m	3.427 +7	0.412	3.427 +7
-133	5.684 +9	30.625	5.684 +9
55 Cs-134	7.275 +3	0.006	2.546 +4
-135	5.021 +3	4,357.849	○5.021 +6
-136	4.496 +6	0.061	4.496 +6
-137	3.260 +8	3,758.310	1.432 +10
56 Ba-140	5.329 +9	73.076	5.329 +9
58 Ce-141	4.950 +9	173.894	4.952 +9
-142	2.078 -7	4,124.579	○2.078 -4
-144	4.327 +9	1,357.230	7.345 +9
59 Pr-143	5.043 +9	74.995	5.043 +9
60 Nd-144	3.014 -6	2,534.810	○3.014 -3
-147	1.890 +9	23.388	1.890 +9
61 Pm-147	1.035 +9	1,115.323	4.456 +9
62 Sm-147	3.668 -2	1,615.237	○3.668 +1
-149	1.895 -7	778.720	○1.895 -4
-151	7.809 +6	306.530	1.051 +9
63 Eu-154	5.228 +2	0.002	6.751 +3
-155	9.563 +6	19.889	7.112 +7
67 Ho-166m	1.331 -3	7.4 -7	○1.012
69 Tm-171	1.587	1.5 -6	5.238

(Ci)할 수 있다고 하면 1,000년 후에는 얼마만큼 될까. 바꾸어 말해서 원자로서 1億kWe를 1,000년간發電을 계속했을 때 최종적으로 생기는放射能의 양이다. 가령, 永久運轉했을 때 지구상에서 발생될 수 있는最終廢棄物의 양을 Cs(Ci)로 하면, 이론상 최초부터 반감기의 6.7배가 지나면最終量의 99%, 10배 지나면最終量의 99.9%에 달한다.

반감기가 100년을 넘는 것은 14종류이다. 表 1(B)의 Cm란에 해당 핵종에 ○표를 붙였다. 이들의長半減期核種의 Cp는 대단히 작으나 그重量은 커서 해마다 년수에 비례하여 축적된다. 우리가 기피하는 α放射의長半減期核種¹⁴⁴Nd, ¹⁴⁷Sm도 매년 생기는 Ci數는 각각 3.0μCi, 36.68 mCi에 불과하나 Gc는 2.5ton, 1.6ton에 달한다. 이들 14核種에 이은 ¹⁵¹Sm, ^{121m}Sn 다음에 ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr을 제외하면 모두가 짧은 기간에最終

량에 달한다. ^{90}Sr , ^{137}Cs 는 모두 매년 3.5億 Ci 가까이 생겨 200년에서 150億 Ci에 가까워진다. 50년의 長半減期를 가지고 있으나, 收率이 $3.82 \times 10^{-6}\%$ 로 특별히 작은 $^{121\text{m}}\text{Sn}$ 의 궁극량은 1萬 Ci에 미치지 못하여 그 중량도 162gr에 불과하다.

한편, 短半減期에 속하는 것에는 1년에 10億 Ci를 넘는 것이 13종류나 있다. 이들은 모두가 빨리 安定化한다. 그러나, 반감기가 0.78년인 ^{144}Ce , 또 그것이 2,623년인 ^{147}Pm 과 같이 일정 기간은 ^{90}Sr , ^{137}Cs 보다 Ci數가 많은 것도 있다. 일반적으로 Cp/Gc의 값은 質量數와 半減期の 곱에 逆比例한다.

表1(B)의 Cp를 가하면 574億 Ci, 이것을 냉각하면 54億 Ci로 줄어든다. 매년 새로이 발생량이 더해지는데 Cm의 합계는 921億 Ci에 불과하다. 중량은 Gc의 합계 32.2ton에 대해 表에서 22,000톤이나 된다. 즉 내용성분이 시간이 지남에 따라 長半減期の 핵종으로 변해가는 것이다.

表에서 보는 바와 같이 희귀한 안정원소도 많이 생기고 있다. 그러나 화력발전에서의 석탄 재와는 달리 양적으로 많지 않은 것이므로 적당한 元素分離에서 다시 핵종의 自動分離裝置의 개발이 기대된다. 그러나, 이때 반드시 지켜야 할 문제는 生活環境에 安定元素라 할지라도 부주위로 방출해서는 안된다는 것이다. 환경과의 違和感을 일으킬지도 모르기 때문이다. 당분간은 그 대부분을 보관하고 또한 그것을 確率的으로 준비된 自動監示下에 두어 이상이 생길 경우 대처하는 방식을 후세의 사람들이 활용할 수 있도록 준비되어 있어야만 할 것이다.

그런데, 被覆管內에는 表1 외에도 誘導放射能 이 생기는데 여기서는 제외한다. 冷却劑 속에 생기는 ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co 등은 우선 발전소에서 방사능 문제를 일으킨다. 이것은 소위 크루드 문제의 해결에 기대해야 한다.

앞의 表에서 보는 稀가스 Kr, Xe와 따로 피

복관내에 생겨 우리가 싫어하는 ^3T 와 ^{14}C , 또 연소에 의해서 생기는 악질의 超우라늄元素에 대해 다음에 기술하겠다.

3. 稀가스와 그밖의 특별한 問題

稀가스

^{85}Kr 은 100년 남짓으로 最終量 6.82億 Ci에 달한다. 이것이 地上 10km內에 氣壓에 비례해서 확산되면 지상에서의 농도는 $2.19 \times 10^{-10} \mu\text{c}/\text{cc}$ 로 대중에 대한 허용량의 1,000분의 1 이하이다.

그러나 문제는 放出點 근방이다. ^{85}Kr 은 위의 경우 매년 4.263×10^7 Ci가 생기는데 이것이 365일 고르게 방출된다고 하면 5,000 Ci/H정도가 된다. 지금, 放出率 1Ci/H에 대해 방출점 가까이의 년평균 최고 농도가, 예컨대 굴뚝 높이가 지상 65미터인 경우 1km 지점에서 $10^{-10} \mu\text{c}/\text{cc}$ 가 된다고 하면, 이것만으로도 大衆許容濃度 $3 \times 10^{-7} \mu\text{c}/\text{cc}$ 를 넘는다. 방출점에 대해서는 주변의 氣象을 오랜 세월을 걸쳐 세밀히 조사해서 필요한 管理區域을 설치함과 동시에 엄중한 放出制限을 설정해 둘 필요가 있다. 거기에다가 완전히 독립된 필요 갯수의 방출점을 예비를 포함해서 준비해 두어야 한다. 또 환경에 대해서는 永久的이어야겠지만, 사람에 대해서는 당연히 제한이 따름을 고려하여 그 대책을 마련해야 할 것이다.

^{135}Xe 의 不安定成分의 Ci數 Cp는 ^{85}Kr 의 그것에 대해 130배나 많으나 半減期가 5.29D이므로, 예컨대 연료의 切斷이 35일 늦어질 때마다 2자리 減衰해서 安定화한다. ^{85}Kr 의 隔離處置도 생각할 수 있는데 安定성분이 15배, Xe과 분리되지 않으면 그 10배나 많이 安定성분이 나온다. 가스分離를 할 수 있다면 곧바로 응용하는 길도 있을 것 같다.

^3T

^3T 는 원래 中性子が Boron, Lithium, Deut-

erium과 반응해서 생기는 것도 있으나 여기서는 被覆内に 생기는 것만을 기술한다. 특히 피복속에서는 核三分裂에 의해서 생기는 것이 가장 많으며 그 收率は $8 \times 10^{-3}\%$ 라든가 여러가지로 말하고 있다. 발생할 때는 다량의 에너지를 가지고 연료속을 飛散하여 피복 특히 지르코늄속에서 흡수된다. 그래서 지르코늄 피복인 경우에는 냉각수 속에 나오는 것이 1%이하로 대단히 적다.

그런데 여기서는 일단 等價의으로 생각해서 收率 $1.2 \times 10^{-2}\%$ 로 다소 크게 잡아 이것이 연료 처리시에 나오는 것으로 가정하면, 1KWe의 운전에 대해 1년 후에 축적된 총량은 1.58MCi, 100년 남짓이면 最終量 28.9MCi에 달한다. 3T 가 大氣中에 나오면 그 속에서 멈추는 반감기는 35~40일이라고 한다. 대기중에 나온 것은 비가 되어 결국은 바닷물 속에 들어가고 다시 비가 되어 널리 육지의 물을 오염시키게 된다. 결국 99%가 바닷물 속에 멈춘다고 한다.

바닷물 속의 3T 의 전량은 27MCi라 하고 있는데 原爆實驗 등으로 인해 증가하여 현재는 1,700mCi라고도 하고 있다. 바닷물의 全體積은 $1.37 \times 10^{18} m^3$, 여기에 28.9MCi가 고르게 확산되면 $2.1 \times 10^{-11} \mu c/cc$ 로 대단히 적은 값이다. 그러나 고르게 충분히 혼합될 때까지의 局所的인 경우를 미리 철저하게 조사할 필요가 있다.

^{14}C

^{14}C 의 발생은 연료 속에서 (1) $^{17}O(n,\alpha)^{14}C$, (2) $^{14}N(n,p)^{14}C$, (3)核三分裂에 의한다고 한다. 輕水爐에서는 (1)이 가장 많아 전체의 50%를 점하며, (1), (2), (3)의 합계로는 20mCi/MWe year [UNSCEAR] 정도라고 하고 있다. 1億KWe를 連續運轉하면 매년 약 2,00Ci가 생긴다. 1천년 후 즉 Cm은 1.88MCi가 된다. 大氣圈內에는 3.8MCi가 現存한다고 하고 있다. 매년 2,000Ci씩 축적된다면 평균적으로 생각해서 당분간은 문제가 되지 않는다.

오늘날 대기중의 탄소의 양은 燃焼와 樹木의 亂伐로 인해 대단히 빠른 속도로 증가하고 있어서 ^{14}C 의 安定炭素에 대한 比放射能은 평균적으로는 내려간다고 할지 모르겠다. 그러나 대기중에 배출하면 그 근방의 ^{14}C 의 농도가 높아진다. 따라서 주변에 사는 사람이 食物을 그 근방의 것만으로서 충당했다고 하면 농축되어 대량으로 經口攝取하게 된다. 個人被曝線量은 安定炭素 1gr 당 ^{14}C 가 1pCi 포함되어 있으면 0.2mrem/year이 된다고 한다. 그리고 1Ci/year의 비율로 계속 방출되면 安定炭素 1그램당 0.2pCi 증가한다고 하고 있다. 이에 따르면 매년 2,000Ci의 安定炭素 1그램당 400pCi, 따라서 이것만으로도 80mrem/year이나 피복하는 셈이 된다. 集團預託線量에도 문제가 있다. 철저한 태도가 필요하다. 요사이 와서 保持裝置가 발달하고 있다. 그 발전을 기대해야 할 것이다.

燃焼에 따른 超우라늄元素

그림1은 輕水爐에서 3.1% 濃縮우라늄을 태웠을때에 燃焼度에 따른 ^{235}U 가 감소하는 방법, ^{238}U 이 Pu가 되어 연소한 量 Pu(+), 연료내에 잔존하는 量 Pu(-) 및 ^{236}U 이 생겨나는 모양을 예로 들었다.

그림2는 殘存 Pu(-)의 각 성분의 변화를 표시했다. 이중 ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu 는 반감기가 길어 연료로서 사용할 수 있다. 그러나, ^{241}Pu 는

그림 1 燃焼度 燃料成分 变化(3.1% 농축연료)

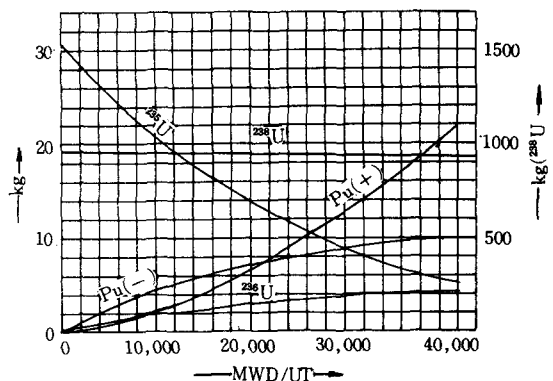
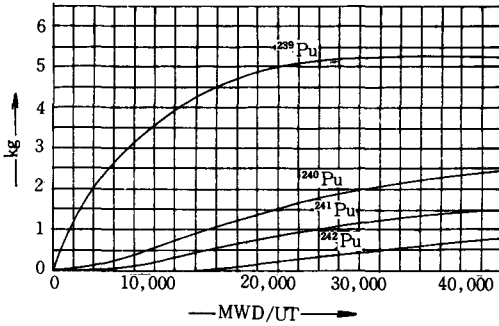


그림 2 燃焼 殘存 成分变化(3.1% 농축연료)



반감기가 13.2년이므로 버려두면 β崩壞해서 ²⁴¹Am로, 다시 458년의 반감기로 ²³⁷Np로 변한다.

위의 40,000MWD/UT의 보기에서 ²⁴¹Pu은 1.47 kg이 생긴다. 이것을 오래 냉각시켰을 경우 冷却年數에 따라 각 원소의 kg數는 많은 차이가 있으며 Pu와 Am의 소멸과 생성은 비례한다. 1億KWe의 사용후 핵연료를 이와같이 취급하면 이것의 3,000배 가까이 된다. 핵분열에 의한 α放出核種 ¹⁴⁴Nd라든가 ¹⁴⁷Sm에 비해 Ci가 극히 크다. 이런 점에서 빠른 재처리로 Pu을 다시 활용하고 그 후에 냉각 기간을 취하는 것이 바람직하다. 특별한 長半減期를 가지며 α崩壞하는 이들 超우라늄 원소의 관리에는 특별한 배려가 필요하다.

國際會議 參加案内

本欄은 한국대표단 파견이 예상되는 국제회의를 종합하여 안내하기 위하여 이번호부터 새로 마련하였시오니 회의참가 준비에 참고하시기 바랍니다.

1. ENC '86대회

- 기 간 : 1986. 6. 1~6. 6
- 장 소 : 스위스(제네바)
- 참가신청마감 : 1986. 5. 10(토)

2. ENC '86대회참가 및 구라파원자력 시찰단 파견

- 기 간 : 1986. 5. 31~6. 15
- 시찰지 : ENC '86대회참가 및 구주 5개국 원자력시설
 - 스위스 : SNA NPP, Goggen-Daniken NPP
 - 프랑스 : Super Phoenix NPP, 프랑스 전력공사(EDF) Framatome S. A., 프랑스 원산
 - 벨기에 : Dole NPP, Eurochemic 연구소
 - 서독 : Philippsburg NPP, Kraft Werk Union AG
 - 스웨덴 : 스웨덴 국영전력(SSPB), Ringhals NPP

○참가신청마감 : 1986. 5. 10(토)

3. 캐나다원자력협회 연차대회

- 기 간 : 1986. 6. 8~6. 10
- 장 소 : 캐나다(토론토)
- 참가신청마감 : 1986. 5. 10(토)

4. 개량 원자력서비스 심포지움

- 기 간 : 1986. 6. 11
- 장 소 : 캐나다(토론토)
- 참가신청마감 : 1986. 5. 10(토)

5. ANS 하계대회

- 기 간 : 1986. 6. 15~6. 18
- 장 소 : 미국(네바다주 리노시)
- 참가신청마감 : 1986. 5. 10(토)

6. 제 8 회 한일원자력산업세미나

- 기 간 : 1986. 10월중
- 장 소 : 일본

7. ANS/AIF 합동동계대회

- 기 간 : 1986. 11. 16~11. 21
- 장 소 : 미국(워싱턴 D.C.)
- 참가신청마감 : 1986. 10. 15(수)

참가신청 : 한국원자력산업회의
국제협력부 (755-0163/4)

社團 韓國原子力産業會議
法人