

日本乏燃料管理系统分析：(I)

对材料平衡和贮存需要的预测

Koji NAGAN

(电力工业中央研究院 (CRIEPI) 社会经济学研究中心)

前言

介绍了用“SFTRACE”（乏燃料贮存、运输和成本评价系统）分析日本未来乏燃料的累积及适当的管理战略，该系统包括3个子模型：（1）乏燃料贮存技术的经济成本数据库；（2）反应堆混合氧化物和钚利用的远期效果模拟；（3）对乏燃料管理战略的具体模拟。

远期效果模拟展示了在某个时间点应该解决全日本多少乏燃料库存的宏观概况。初步计算表明，到2050年在日本需要贮存的乏燃料将有很大变化——从减少到零或持续增加达到20000~25000 tHM。乏燃料管理模拟的子模型是论证日本处理乏燃料累积战略的工具，这些乏燃料在假设的时间范围内存放在每个核电厂场址上或许多中心设施中，并需要运输。一个示例性分析示出了乏燃料管理战略涉及因素之间的平衡关系，例如“离堆(AFR)”贮存能力和全面运输要求，生动地证明了一体化分析工具的用处。

关键词：乏燃料，在堆贮存，离堆贮存，材料平衡，模拟

1 引言

核电厂经过数年的运行，不断增加的由乏燃料引起的压力在日本受到了极大关注，目的是让那些核电厂在不造成电厂内贮存池超出贮存能力的情况下继续运行。为管理与整个系统有关的风险，需要有战略规划及战略分析工具，而认真避免贮存池可能超出贮存能力，从而保持核能在国家能源系统中的可操作性。

在描述了日本乏燃料的现状和远景之后，本文首先将乏燃料管理规划的分析方法分类。从有限地理范围内（例如一个电厂或一个电力公司）的微观衡算到全国范围的宏观战略模拟，潜在的用户会注意到这样的事实，即对方法的选择会严格依据具体的目的。然后本文作者根据日本国情提出一个乏燃料管理的一体化分析工具。在接下来的一节中解释了模型结构之后，列出了示例的数字结果。

2 日本乏燃料的现状和远景

表1示出了截至2001年3月日本所有核电厂乏燃料累积的现状，并附带2000年9月之后6个月内的变化。日本目前的核电状况是：53个机组，总装机容量为45.9 GWe（见图1^[2]），每年卸出约900 tU乏燃料。产生的这些乏燃料主要存储在核电机组场址的乏燃料池中。由于乏燃料存储量已接近乏燃料池的容量，一些核电厂被迫增加存储能力，以避免乏

燃料池的存储量超出贮存能力。1997年在东京电力公司的福岛 I 核电厂建成了一个容量为 1120 tU 池式贮存设施，以及一个干式金属屏蔽容器贮存设施。这些设施示于图 2^[2]。按照此方针，在日本原子能公司（JAPCO）的东海 2 核电厂建造了容量为 260 tU（24 个屏蔽容器）干式金属罐贮存设施，见图 3^[2]。其它几个电厂通过重新安装贮存架，也增加了贮存能力，在表 1 中列出了一些。

很明显提高现有反应堆现场（AR）贮存设施能力的机会几乎没有了，这就明确暗示迫切需要采取离堆（AFR）贮存措施。2000 年 11 月青森县陆奥市宣布，邀请东京电力公司在其地域内进行 AFR 贮存设施的场址调查。因为场址的特性调查早已开始，希望该倡议能为其它电力公司打开通往此方向之路。

表 1 日本核电厂中贮存的乏燃料（tHM）

截至 2001 年 3 月

电力公司	核电厂	堆芯装料	每批燃料	贮存的乏燃料	贮存能力
北海道	泊	100	30	250(+10)	420
东北	女川	160	40	200(+10)	370
东京	福岛-1	580	150	1140(+40)	2100
	福岛-2	520	140	1280(+30)	1360
	柏崎·刈羽	960	250	1470(+100)	1890
中部	滨冈	420	110	730(+10)	860
北陆	志贺	60	20	50(+20)	100
关西	美滨	160	50	280	300
	高滨	290	100	850(+60)	1100
	大饭	360	120	740(+70)	1370(+530) ^{a)}
中国	岛根	170	40	340(+70)	440
四国	伊方	170	60	330	980(+450) ^{b)}
九州	玄海	270	100	420	1060
	川内	140	50	580(+10)	900(+200) ^{c)}
日本原子能发电公司	敦贺	140	40	440(+10)	870
	东海-2	130	30	220	260
	总计	4630	1330	9290(+380)	14380(+1190)

（来源）发电公司联合会(FEPC): <http://www.fepec.or.jp>

*括号中的变化是 2000 年 9 月以后的。

a) 3 号和 4 号机组重新安装贮存架

b) 3 号机组重新安装贮存架

c) 1 号和 2 号机组重新安装贮存架

乏燃料管理的远景，即对额外贮存设施的需求，在很大程度上受下列因素影响：

(1) 目前正在青森县六个所村建造的设计生产能力为 800 tU/a 的日本核燃料有限公司（JNFL）后处理厂，何时开始运营以及生产能力能达到多少。

(2) 预计从 2010 年开始的机组退役后一次全堆芯卸料，而电厂内贮存池在退役的某个阶段也将拆除。

即使六个所后处理厂能够成功以设计能力运营，它也不能每年接收日本核电厂的全部

卸料，以及过去的卸料。政府的官方观点示于图 4 和表 2。那些基本假设，尤其是后处理厂的进度表已经过时了，因为 JNFL 的六个所后处理厂已经重新制定了进度表，计划在 2005 年 7 月开始运营。此实例清楚地说明了根据上面提到的因素的变化重做预测的重要性。

表 2 乏燃料管理的官方期望 (tHM)

(来源：国家资源和能源机构“关于乏燃料中间贮存”，1999)

	1997~2010	2011~2020
累积乏燃料(a)	15200	16000
运往 JNFL/六个所后处理厂的乏燃料(b)	5900	8000
运往海外后处理厂的乏燃料(c)	70	—
AR 贮存能力 (d)	5300	4200
AFR 贮存的要求(a-b-c-d)	3900	3800
累积 AFR 要求	3900	7700

从长远方面说，明显需要大规模贮存设施。尤其是在 2010 以后，那时一些老的商用轻水堆电厂可能要退役。随后一系列轻水堆电厂要关闭，这就意味着将会出现一方面是大量一次性乏燃料卸出而与此同时损失了现场的贮存能力。

3 方法学和模型结构

3.1 预测乏燃料平衡和贮存需求的方法学

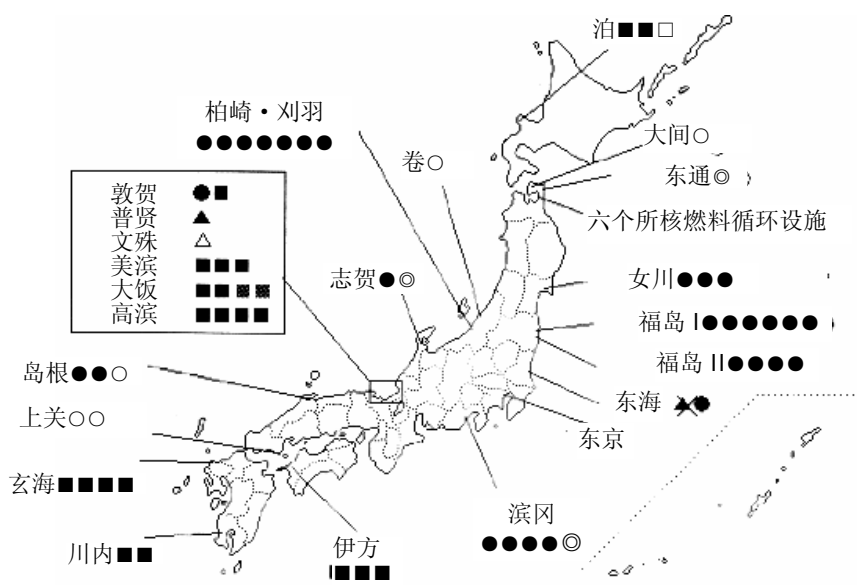
图 5 示出了在分析乏燃料管理战略时应该考虑的因素。在一个国家将乏燃料直接处置作为国家政策的情况下，图 5 中的“后处理设施”应该换成“地质处置库”。即使在直接处置的情况下，下面意见也适用。涉及的设施数将依据分析的具体范围或地理边界而定，反映出分析的目的。乏燃料平衡计算有如下 3 种方法：

(1) 为每个电厂和/或电力公司核算

微观核算着重于根据已有的贮存能力计算每年乏燃料卸料的累积量。如果预期要超出贮存能力，那么要在场址内（即 AR 贮存）规划增加贮存能力。无疑，所有核电站和/或电力公司都必须用该方法描绘一个最合理的场景，必要时设计一个应急控制场景。

(2) 远期模拟

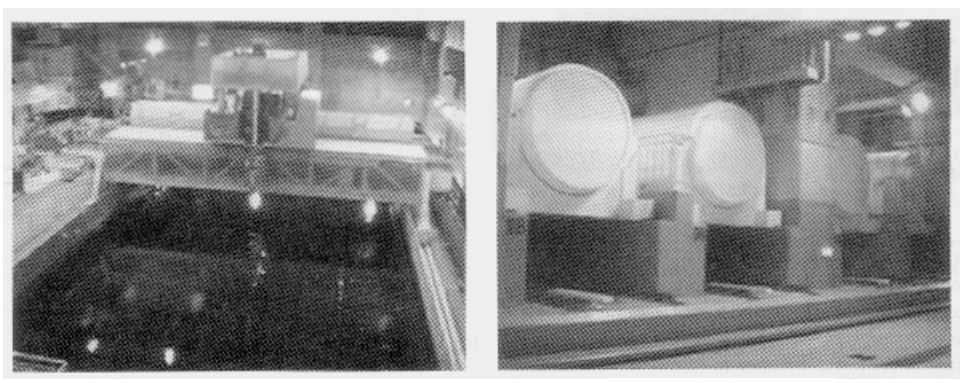
宏观计算覆盖较大的地理范围，适用于一个拥有多个核电站的电力公司、一个有多个电力公司的地区或国家。该计算基本上是根据第一种方法微观计算的所有相关结果的总和，在合适的情况下，可以选择乏燃料在各电厂之间和/或电力公司之间转运。依据下面总战略的选择设定几个场景：是选择在每个场址的单个 AR 贮存装置，还是选择集中贮存设施（即 AFR 贮存设施，控制超出贮存能力），还是允许在各场址间转运等。如果不久就会有足够的管理乏燃料的贮存和装卸能力，用该方法可以解释一种管理战略，与此同时可以用经济指标和其它性能指标判断哪一个战略最理想。



堆型	运行中	建造中	建造筹备中
PWR	■	◇	□
BWR	●	◎	○
GCR,FBR	▲	△	

总装机容量	运行中		建造中		计划中		总计	
	机组数	GWe	机组数	GWe	机组数	GWe	机组数	GWe
1991年9月	41	32	11	12	3	2	55	36
1996年12月	51	43	4	3	2	2	57	48
2002年1月	53	45.9	4	4.12	6	7.24	63	57.26

图1 截至2002年1月日本的核电厂情况
(注: 东海-1核电厂已于1998年3月31日关闭)



(a) 池式贮存 (b) 金属屏蔽容器贮存

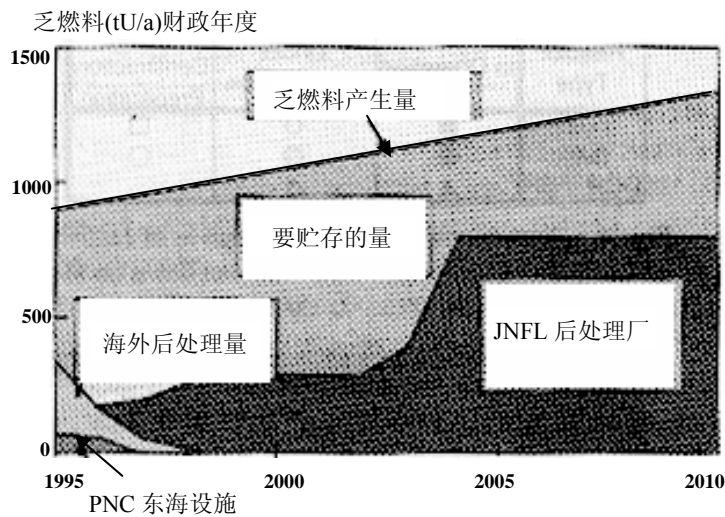
图2 在福岛 I 核电厂的 AR 贮存装置

(3) 远期最优化

如果有铀再循环方案，乏燃料管理场景就可能要复杂得多，因为铀再循环在不同时间会产生不同的乏燃料（ UO_2 和 MOX）。这种方法的目的根据铀再循环要达到的程度、要建造的乏燃料后处理设施贮存能力的大小以及整体乏燃料管理战略构想，来最优化核能生产及利用的整体国家战略。很明显，重点应放在国家反应堆混合战略上，带乏燃料管理的燃料循环战略作为协调方式的核心。该模型不仅包括核能生产部分，还结合了整个能源系统模型，这样，就计算出了核能生产的最佳水平。远期最优化技术的例子可见于本文作者开发的 FCOM（燃料循环最优化模型）应用中，^[3,4]更详尽的细节可见一体化能源环境预测框架——LDNE21 模型（21 世纪线性动态新地球）模型。^[5]



图 3 截至 2001 年在东海-2 核电厂建造中的干式金属罐贮存设施

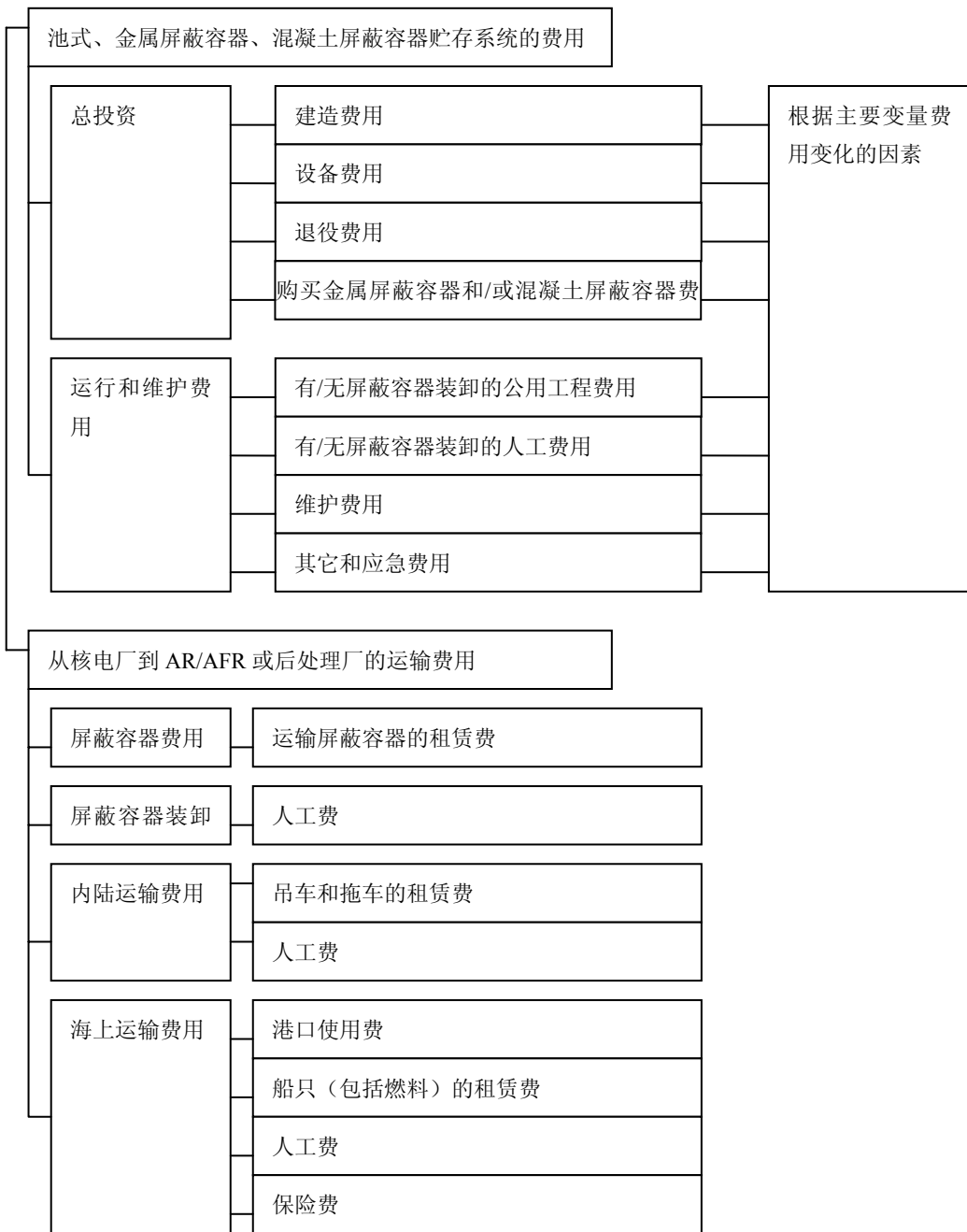


假定：

财政年度	1995	2000	2010
核电生产能力(GWe)	4150	4500	7000
乏燃料年卸出量	900~1300 tU/a		
PNC 东海后处理厂	1996 年底接收乏燃料		
JNFL 后处理厂	1997 年开始接收乏燃料。2003 年以 800 tU/a 的生产能力开始运营。		

图 4 对乏燃料产生量和管理预测 (来源：通产省)

表 3 成本数据库结构



3.2 模型结构

本文作者开发的此模型命名为 SFTRACE^[6]（乏燃料贮存、运输和成本评价系统），它主要建立在上一节描述的远期模拟方法上。图 6 是对该框架的概述。SFTRACE 有 3 个子模

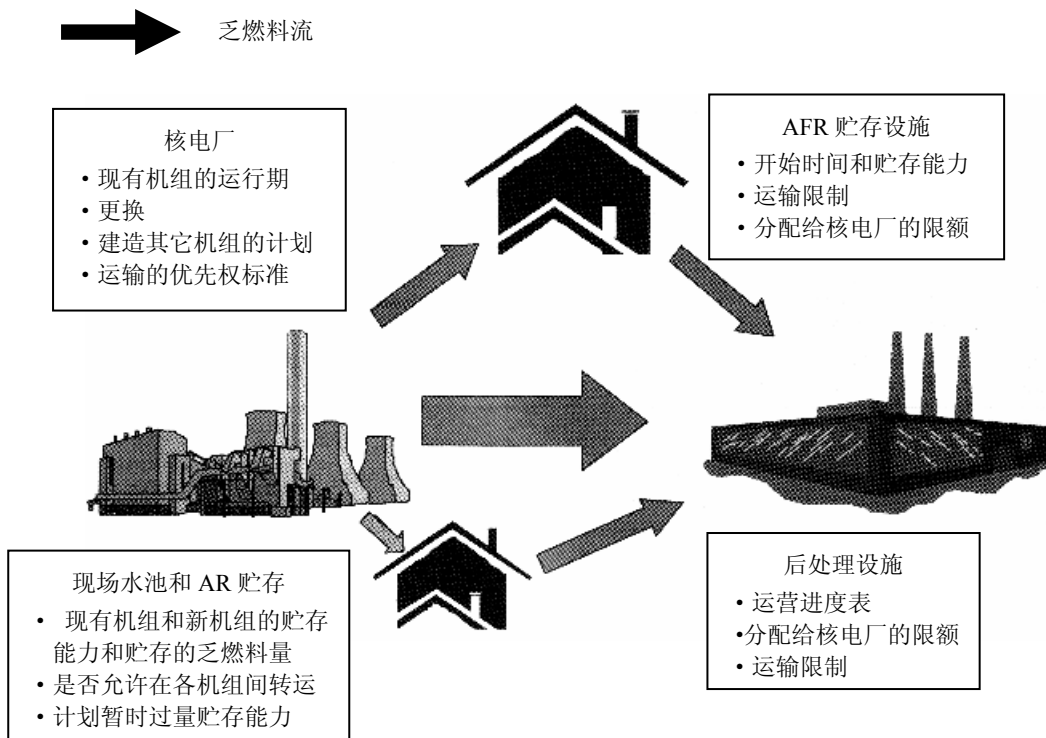


图 5 在乏燃料管理战略分析中要考虑的因素

型：

- 贮存成本数据库
- 远期反应堆混合模拟
- 乏燃料管理战略的模拟

3.3 贮存成本数据库

乏燃料贮存的成本数据库包括水池、金属屏蔽容器和混凝土屏蔽容器技术方案各成本项以及相关运输成本的一整套数据。在该数据库中还补充了根据具体的重要变量各项成本变化因素。例如，建造成本用贮存能力的函数表示，反映了经济规模的大小。表 3 显示了该数据库的各项。

3.4 远期反应堆混合模拟子模型

在该子模型建立之初有一套核电（或是轻水堆(LWR)和/或其它类型的反应堆）总生产能力的假定。该子模型的主要特点是具有计算材料平衡的能力，不仅能计算与动力堆运行有关的所有输入和输出材料，还能确定铀使用的合适水平。在乏燃料后处理设施（假定了运行时间表），相应的同位素组成产生相应量的铀。该模型计算了再循环程度，使得在某个再循环时间段内要消耗掉所有铀。所以卸出的乏燃料组成将随铀再循环程度而变。

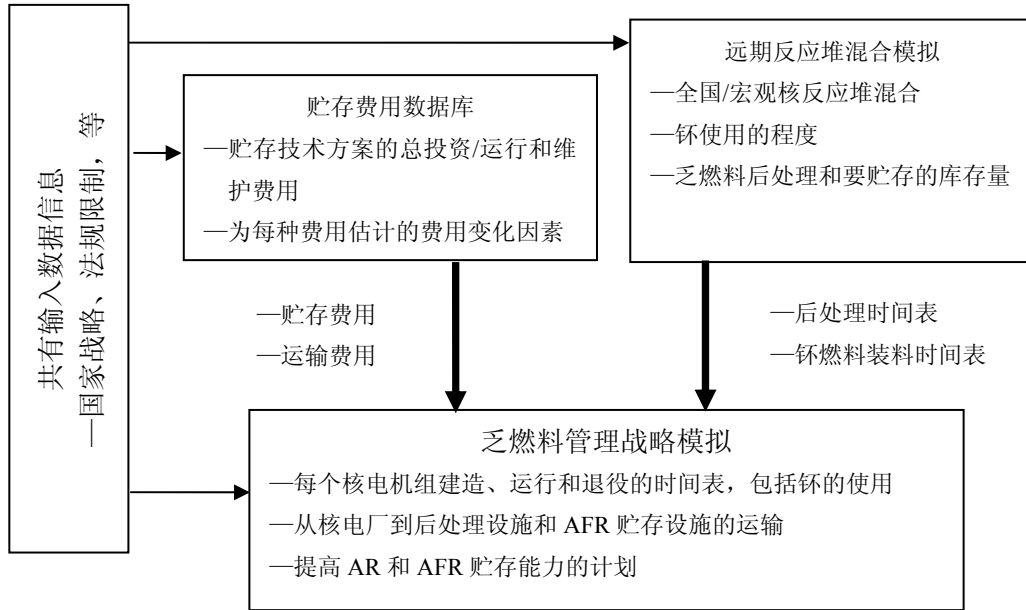


图 6 SFTRACE 的子模型结构

3.5 乏燃料管理战略子模型模拟

整个框架的主要特点涉及包括所有相关设施的整个系统，即核电厂、已经计划或已经建成的 AR 和/或 AFR 贮存设施、后处理设施，以及两个地点之间的运输活动。正如在图 7 中详细说明的，子模型根据不同的目的以 tHM 或组件的形式，跟踪所有乏燃料的当前位置、运往另一个地点的运输，以及“消失”在后处理设施中。连同每个核电厂贮存能力的信息，可以确定超出贮存能力的各种风险，换言之就是确定对贮存的要求，然后子模型允许在核电厂（AR 贮存）或者作为集中方式的另一个地点（AFR 贮存）建造新的贮存设施。

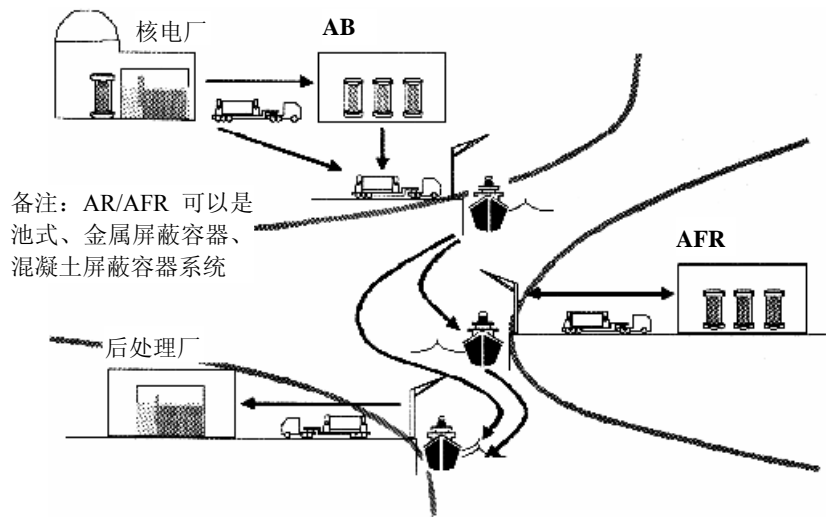


图 7 乏燃料管理战略模拟子模型的示意图

4 解释性说明模拟结果

4.1 钚在轻水堆中的利用及其在乏燃料管理中的含意

图 8 显示了远期反应堆混合模拟。主要假定如下：

— 根据核电厂装机容量的基础是现在所有设计为 40 年寿期的发电能力、所有在建和计划建造的装机容量，国家政策指出，在 2010 年新建核电装机容量将达到 70 GWe，目的是达到“京都”目标。在此之后还要建造更多的核电厂，以补偿因电厂退役而减少的容量，减少的部分将由自退役开始 16 年后新增加的 1350 MWe 机组所替代。由于过去的建造活动不规范，该替代原则将使发电容量在 2030~2040 年期间暂时增加，如图 8 所示。

— UO_2 乏燃料用下列两种方式中的任一种进行后处理

情况 O：优先后处理燃耗较低（平均为 33000 MWd/tU）并已冷却了较长时间的老的燃料。由于钚含量较少，这种情况产生的钚将会比另一种情况产生的少。

情况 N：优先后处理燃耗较高（平均为 45000 MWd/tU，1990 年以后装的料）并已冷却了 5 年以上但短于其它情况的新的燃料。

从 2005~2050 年以 800 tHM/a 生产能力提供后处理业务。仅后处理 UO_2 乏燃料。

所有回收的钚作为与 UO_2 燃料完全兼容的 MOX 燃料在轻水堆中再循环。

表 4 从远期反应堆混合模拟计算得出在 2050 年对乏燃料管理的要求 (tHM)

模拟情况	低燃耗乏燃料, UO_2 乏燃料	高燃耗乏燃料, UO_2 乏燃料	MOX 乏燃料	要管理的总量 (A)	AR 总贮存能力 (B)	对新贮存玻璃需求 (C=A-B)	2020 年开始运营的第二个后处理厂	对贮存需要的范围
O	0	39000	10000	49000	24000~27000	22000~25000	—	0~25000
N	7000	30000	11000					
O+2Rep	0	21000	13000	34000	7000~10000	$\Delta 8000$		
N+2Rep	0	23000	11000					

对每种预测情况的假定：

情况 O：没有第二个后处理厂。第一个后处理厂优先接收原有的乏燃料。

情况 N：没有第二个后处理厂。第一个后处理厂优先接收较新的的乏燃料（较高燃耗）。

情况 O+2Rep：第二个后处理厂 2030 年开始运营。不后处理 MOX 乏燃料。优先接收原有的乏燃料。

情况 N+2Rep：第二个后处理厂 2030 年开始运营。优先后处理 MOX 乏燃料和原有的乏燃料。

总装机容量在 2010 年和 2050 年分别为 70 GWe 和 80 GWe。

假定 AR 的贮存能力为 300 tU/GWe，略高于目前的平均水平（270 tU/GWe）。

假定第二个后处理厂 2030 年开始运营，生产能力为 800 tHM/a。

在 1992 年以前换料用的二氧化铀燃耗低（平均在 33000 MWd/tU），1992 年以后较高（45000 MWd/tU）。

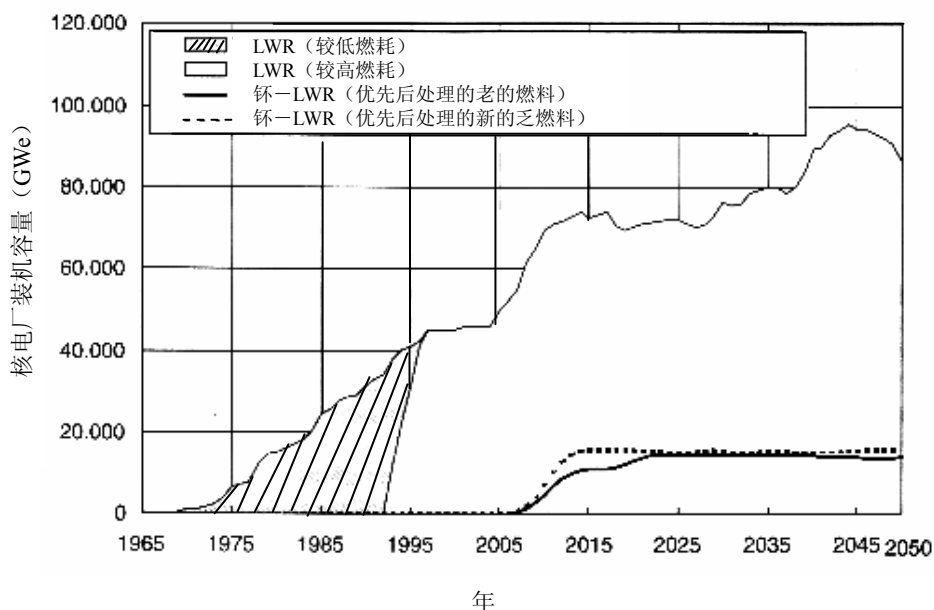


图 8 远期反应堆混合模拟的示例结果

情况 O 和情况 N 在后处理之后会产生不同量的钚，会使钚在轻水堆中再循环的数量不同，如图 8 所示。反过来又会使产生的 UO_2 乏燃料和 MOX 乏燃料的组成不同，尽管总量是一样的。表 4 示出了乏燃料管理要求的含意，在表 4 中，前两种情况分别对应于情况 O 和情况 N。后两种情况分别与情况 O 和情况 N 一样，只是增加了生产能力为 800 tHM/a 在 2030 年开始运营的第二个后处理厂，在敏感情况下提前 10 年开始运营（即 2020 年），如表 4 所示。尽管下面的假定还应该核实，但下面的观测数据是从例证研究中导出的：

- 可以相对准确地中期预测乏燃料卸出及其累积量，例如，到 2030 年乏燃料贮存需求将一直增加到 10000 tHM。
- 在直到 2050 年这段长时间里，日本乏燃料贮存需求会有很大变化，从减少到零，到保持持续的增加态势，直到 2050 年的 20000~25000 tHM。
- 乏燃料（即已很好冷却的低燃耗 UO_2 乏燃料、新的高燃耗 UO_2 乏燃料和 MOX 乏燃料）不仅在总量上，而且在组成上在以后将依总体战略而变。有必要为正确管理进行认真规划，例如，贮存设施、贮存和/或运输用容器设计。

4.2 乏燃料管理战略规划

由于没有必要了解每个核电厂运行程序的具体情况或其与模型一致，这里显示的只是子模型在一套初步数据基础上能够说明问题的一个示例。^[7] 图 9 的 (a) 和 (b) 用与图 8 和表 4 相同的假定，显示了乏燃料管理战略的结果。子模型给出了按分类（即 UO_2 和 MOX）和产生时间（即自卸出开始的年数）的乏燃料数量的具体结果，以及乏燃料的地点。尽管图 9 是按所有“多出来”的乏燃料将放在 AR 贮存装置中做的，该模型也能考虑 AFR 设施的可能性。在这里，作为示例考虑了 3 种 AFR 贮存战略：

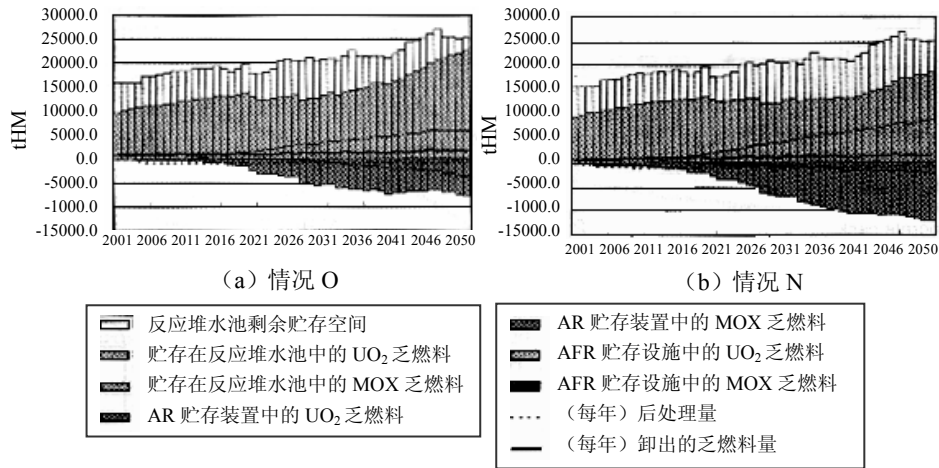


图 9 乏燃料管理战略模拟的一个示例

(注：图例说明了“AFR 贮存设施中的 UO₂ 乏燃料”和“AFR 贮存设施中的 MOX 乏燃料”，这两种情况在上面两个图中没有出现，因为所做的计算是假定没有安装 AFR 设施。)

- 日本 10 个电力公司各自管理其乏燃料并单独建造 AFR 贮存设施。
- 几个电力公司合作建造地区 AFR 贮存设施。在这种情况下，划分了 3 个地区块，在每一个地区建造一个 AFR 设施。
- 所有电力公司合作建造一个国家级 AFR 贮存设施。

结果列在了表 5 中。由于有后处理优先规则，在 AFR 贮存能力和对运输的总需求之间是平衡的；为了限制贮存总量，需要更频繁地将乏燃料从 AFR 设施运进、运出。另外在总贮存能力和地区合作上也是平衡的。单独处理可以在一个企业有需求时再建造贮存设施，不用过早投资，而集中战略必须在第一个企业有需求时就要将资金全部投入。这些方面清楚地论证了像 SFTRACE 这样的一体化分析工具的必要性，它能充分分析乏燃料管理战略中各因素之间的平衡关系。

表 5 对模拟结果的解释：AFR 贮存装置，累积运输要求和 2050 年在 AFR 贮存乏燃料量(tHM)

AFR 战略	情况 O: 优先后处理老的乏燃料						情况 N: 优先后处理新的乏燃料					
	AFR 贮存		运输			2050 年贮存在 AFR 的乏燃料	AFR 贮存		运输			2050 年贮存在 AFR 的乏燃料
	贮存能力	建造时间	核电厂运往 AFR		AFR 运往后处理厂		贮存能力	建造时间	核电厂运往 AFR		AFR 运往后处理厂	
			UO ₂	MOX					UO ₂	UO ₂		
每 10 个公司 1 个 AFR	9750	2011 ~ 2047	15000	3700	11500	7200	11100	2011 ~ 2047	9100	1600	400	10000
地区 3 个 AFR	8550	2014 ~ 2027	15000	3800	11000	7800	11200	2014 ~ 2027	9400	1600	400	10600
国家 1 个 AFR	8150	2014	15800	3800	12000	7800	11700	2014	9800	1600	400	11000

作者的目的是要强调本报告中材料平衡计算的框架, SFTRACE 就有根据战略情景的设置计算系统总成本的功能。尽管乏燃料贮存的经济分析和成本分析在其它报告中做了详细讨论^[8], 图 10 还是用归一化乏燃料管理总成本的相对值(即贮存设施和运输成本的净现值(NPV)除以卸出的乏燃料量的净现值)概括了适用于 AR/AFR 贮存设施采用不同贮存技术情况下的整体经济性。

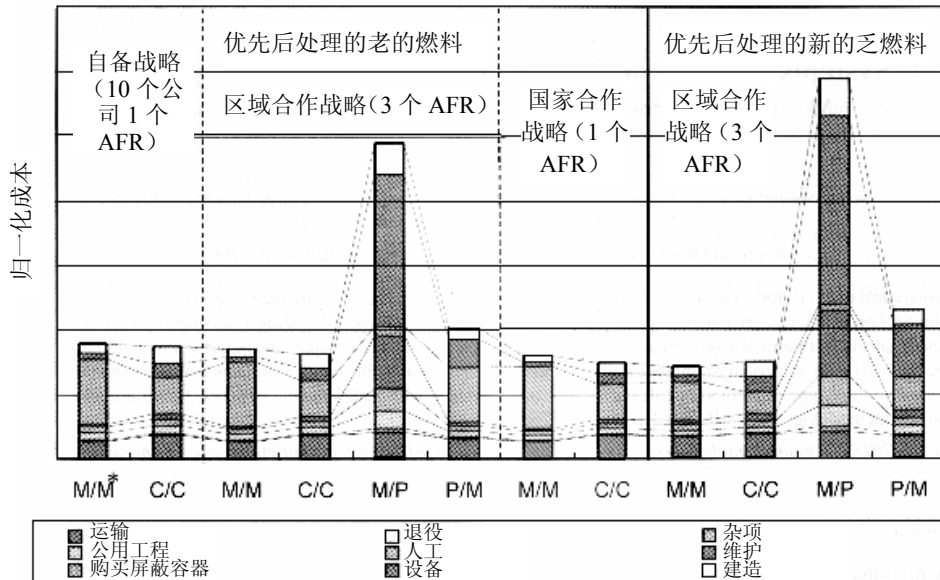


图 10 全部成本比对结果(用相对比例)

*: “X/Y”指的是 X 技术适用于 AR 贮存设施而 Y 技术适用于 AFR 贮存设施;

M: 金属屏蔽容器, C: 混凝土屏蔽容器, P: 水池

虽然由于适用的成本数据的限制, 使各场景之间相比较还为时过早, 但是这些结果更进一步强调该一体化工具的独特作用, 因为可以评价整个系统内的平衡关系, 例如, 运输与贮存之间的平衡关系、反应堆运行战略和乏燃料管理战略之间的平衡关系, 以及各种地区合作程度之间的关系。对于这里使用的数据需要更详细研究和确认, 与此同时也是为判断哪种战略更好。

4.3 观测数据

尽管上面描述的模拟过程仅是对模型的确认, 但可以很好地导出下面政策中的含意。

对乏燃料贮存的需求将会稳步且迅速增加, 在 2020~2030 年达到 7000~10000 tU。到 2050 年围绕乏燃料管理的不确定因素也会成堆。在最可能出现的场景中, 2020~2030 年之后到 2050 年对贮存的需求将稳定在 10000 tU 上下, 建议到 2020 年时建成约 10000 tU 的贮存能力。虽然该贮存可以是单个的和分散的 AR 装置和/或集中的 AFR 设施, 应该关注整个乏燃料管理系统的协调, 以适当地调整各种平衡关系, 诸如贮存设施的地理分布和运输。该分析没有暗示选择哪种贮存技术。根据成本计算, 池式的贮存成本似乎很高, 因此除非它的其它优势压倒成本因素, 否则该方法就会被放弃。分析发现, 在金属屏蔽容器和混凝

土屏蔽容器彼此之间有很大的竞争性。有意思的是，一种比另一种优越的情况会依据具体情况（像贮存能力和运输需要）而改变。需要就这两种技术的比较做进一步的研究。

4.4 结论

在文章中，作者努力概括乏燃料管理战略分析的方法，用 SFTRACE 做例证说明。虽然这个工具很好，完全能分析情况的变因，但本报告中使用的是一套假定和数据仅是用于解释目的，需要进一步详细阐述。作者希望用该工具分析日本的实际情况以及应急控制情况，以获得日本能应对将来不确定情况的战略。

参考文献

- [1] K.Nagano,"A system analysis of spent fuel management in Japan," Proc.PBNC-2002 Inc. Conf., Shenzhen, China, Oct. 21-25, 2002, (2002)
- [2] K.Nagano,"Methodologies for Economic Analysis of Spent Fuel Storage," paper presented at IAEA Technical Meeting on Economics of Spent Fuel Storage, St. Petersburg, Russia, Sept. 9-12, 2002
- [3] K.Yamaji, K.Nagano, "Optimal reactor strategy for plutonium utilization," Proc. IFAC/IFORS/IAEE Int. Conf. on Energy System, Management and Economics (ESME89), Tokyo, Japan, (1990)
- [4] K.Nagano, K.Yamaji, "The needs and economics of spent fuel storage in Japan, Proc. ASME/JSME/AESJ Joint Int. Waste Management Conf. (JIWMC), Kyoto, Japan, (1989)
- [5] K.Nagano, The roles of Nuclear in Global Energy Strategies (I): Simulation by Integrated LDNE21 Optimization Model, CRIEPI Report No. Y02002, Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo, (2002)
- [6] CRIEPI, Demonstration Test of Recyclable Fuel Resources—Development of Concrete Modular Storage Technologies, Final Report for Fiscal Year 2000 submitted to the Government, (2001), [in Japanese]
- [7] K.Nagano, "A strategic consideration on nuclear fuel cycle with spent fuel management as its core," J. Nucl. Fuel Cycle Environ., 8[2], (2002), [in Japanese]
- [8] K.Nagano, "A Systems analysis of spent fuel management in Japan (2): Methodologies for economic analyses of spent fuel storage," J. Nucl. Sci. Technol. 40[4], 182-191 (2003)

(哈琳 译自 Journal of Nuclear Science and Technology 2003,V(40),No.4,p173-181)

日本乏燃料管理系统分析：(II)

乏燃料贮存的经济分析方法学

Koji NAGAN

(日本电力工业中央研究院)

前言

乏燃料贮存的经济分析被分类为三个层次：(1) 静态工程—经济成本估算；(2) 动态战略分析；和 (3) 具体项目财务评估。在描述了日本乏燃料的管理和贮存的现行立法和制度上的演变之后，报告用数字扼要介绍了三个层次方法的应用实例。作为结论，作者认为用户应该根据具体目标选择最适宜的方法类别或计算工具。选择方法的一般导则是应作为结论加以精心描述。

关键词：经济分析，乏燃料贮存，归一化成本，动态模拟，项目财务

1 引言

本文首先讨论日本在乏燃料管理和贮存方法的制度上的发展和新趋向，并且强调私有化机遇。继续全面评估乏燃料贮存经济的分析方法^[1]，其中包括在目前情况下，日本乏燃料管理每种方法的具体数字实例。本文进一步提出可能的用户在根据他们的具体目标选择方法的导则。

2 日本乏燃料管理的最新立法和制度上的演变

乏燃料贮存第一次在发展和利用核能的长期计划中论及是 1987 年发表的^[2]，1994 年它的修订版发表了^[3]，在乏燃料贮存的另一些贮存方法中，增加了专用术语，以及管理乏 MOX 混合氧化物燃料的方法。

通产省下面的全面能源政策委员会下的核能长是制定日本能源政策的主要单位，于 1997 年发表了有关乏燃料贮存中间报告^[4]，该报告主张准备较长期贮存乏燃料并于 2010 年左右部署离堆贮存 (AFR)。内阁采纳了报告并号召采取必要行动。为了计划实现中间报告提出的各点，由政府 and 主要电力公司的代表组建了乏燃料管理措施任务组。任务组经过 1997 年 3 月至 1983 年 3 月的一系列广泛深入的讨论提交了它的最终报告^[5]，报告展现可再循环燃料资源的贮存图景以及可能的管制框架和立法框架。核能委员会于 1998 年 6 月出版的另一份报告^[6]。主要赞同工作组的报告，并强调立法程序和场址选择原则。

特别注意力应给予这样一个事实，即通过这一系列报告，明确认识到乏燃料的贮存是安全的和静态的过程，显然任何私人企业都可以进入贮存市场。

3 乏燃料贮存的经济分析方法

3.1 乏燃料贮存的经济分析方法分类

研究中使用的方法可以按照它自己的目的而变化，在乏燃料贮存经济分析实例中，作者提出对分析方法或工具进行下列分类：

—工程-经济成本计算；收集成本项目的工程估算和汇总每单位服务的币值单位，例如贮存燃料的 tHM (t 重金属)，对具体的贮存设施项目的静态的和固定的假设。

—乏燃料管理系统的战略规划；在一个动态的框架中模拟所有乏燃料的产生量、贮存量、后处理量和处置量，并将某一长期项目与地区的和国家的规模的项目作比较，

—项目财务评估，如果认为私人或政府向贮存项目投资是正确的，那么就要对项目的财务进行评估，用性能指标分析静态寿期情况，诸如内部回收率 (IRR)，支付回收时间，等等。

表 1 列出三类方法的比较。在下面段落用实例提出这些类别的情况。

3.2 工程-经济成本计算

此简单的方法组成了国际原子能机构 (IAEA) 早期研究的关键点^[8]。简单说来，此方法用来计算贮存的归一化的单位成本 (LUC)。一个项目的净现值 (NPV) 为一个项目的测量值，定义为与项目有关的所有贴现成本的总和，即

$$NPV = \sum \frac{C_i}{(1+d)^i} \quad (1)$$

表 1 乏燃料贮存经济性的方法比较

类别	A.工程-经济成本计算	B.乏燃料管理系统战略规划	C.项目财务评估
目的	项目/贮存设施	电力公司/地区/国家	项目/贮存设施
指标	贮存的归一化单位成本 变量：一次总付额 [美元 /tHM] 或 每年付费 [美元 /tHM/a]	乏燃料贮存量与时间的关系，与 A 来的单位贮存成本相结合计算系统总费用的可能性	IRR, 支付回收时间 NPV 和评估投资鉴定的其他指标
目标和强度	比较技术：例如水池，屏蔽容器，等等	在贮存是需要时供对大小进行规划	决定对项目是否进行投资
可能的用户	电力公司/核电厂所有者/政府	电力公司/地区或国家的管制者	私人投资者/咨询公司
缺点	静态的；在应用不同时间的结果需要调整/不易转化为每发电 kWh 时的单位成本	在容量为当地所需时，技术方案所需情景数多	静态的/在计算前打算评估的项目的所有技术规格应该固定/取决于具体的制度条件

式中 C_i 为第 i 年的费用或支出， d 为贴现率和 i 为指定的年。贮存的归一化单位成本为项目整个寿期的归一化的收入现金的 NPV 和支出的 NPV，即

$$LUC = \frac{\sum \frac{C_i}{(1+d)^i}}{\sum \frac{M_i}{(1+d)^i}} \quad (2)$$

式中 M_i 在第 i 年送入贮存设施的乏燃料量。因此式 (2) 基于假设贮存费用以均一的价格 LUC 接收乏燃料，即

$$\sum \frac{LUC \times M_i}{(1+d)^i} = \sum \frac{C_i}{(1+d)^i} \quad (3)$$

图 1 示出归一化的单位贮存成本的比较^[9]。这是在日本环境下，AFR 贮存 3000 tU 的各种技术的比较。虽然水池贮存是一种成熟的技术，现有反应堆水池具有丰富的经验，但是，它的经济性有问题，因为基建投资多和运行-维修费用多（由于需要强制循环和质量控制冷却水。金属屏蔽容器对短期和中期贮存来说，具有很高的优点，因它与水池相比较，容易模块化。

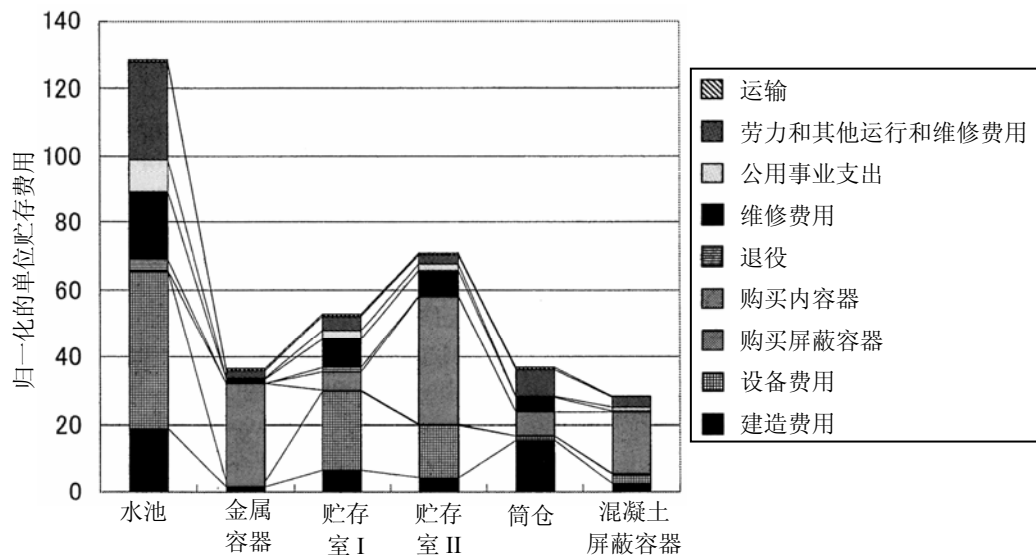


图 1 归一化的单位贮存成本的比较^[9]

就长期贮存来说，研究倾向于其他干贮存技术，目的是取得更好的经济性。研究的关键问题包括：

- 混凝土材料的长期完整性；
- 高放密封容器的长期完整性；
- 运行和维修的安全标准，尤其是运输时的装料/卸料。

虽然早期的数据现在看来有些陈旧，但是还是比较了早期应用的类似技术，包括水池和金属屏蔽容器技术的比较^[10, 11]和 AFR 贮存的各种方案的比较^[12]。图 2 示出最新的 AFR 技术^[13, 14]。不过这儿发现，虽然在图 2 区间数据反映了进一步的发展和改进，但是它与图

1 所示基本相似，图 3 示出图 2 所示的 5000 tU 贮存容量的情况。其中包括按每年的总支付和净现值（NPV）。在所有这些实例中通过技术评估清楚地显示这一技术的力量，尤其是找到有改进可能的关键成本项目，诸如金属屏蔽容器贮存方案中的容器制造或混凝土模块技术中的高放密封容器制造。与此同时，这些方法不一定要涉及有关设施所有者和运营者为进行营运所花费的间接费用。所以可以结论地说，在项目前期发现的最好方法而加以实施，在项目实际实施阶段还必须用实际投资进行补充分析。

在图 2 和 3 可以找到的另一个观点是技术革新的重要性。这有几个方面的理由必须随着时间而减少成本：

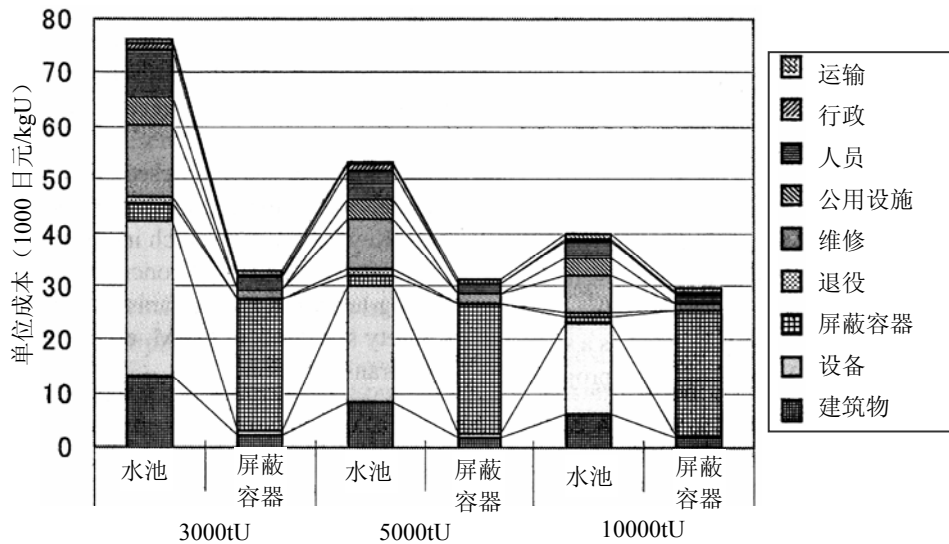


图 2 贮存容量为 3000—10000 tU 的 AFR 贮存成本的比较^[13, 14]

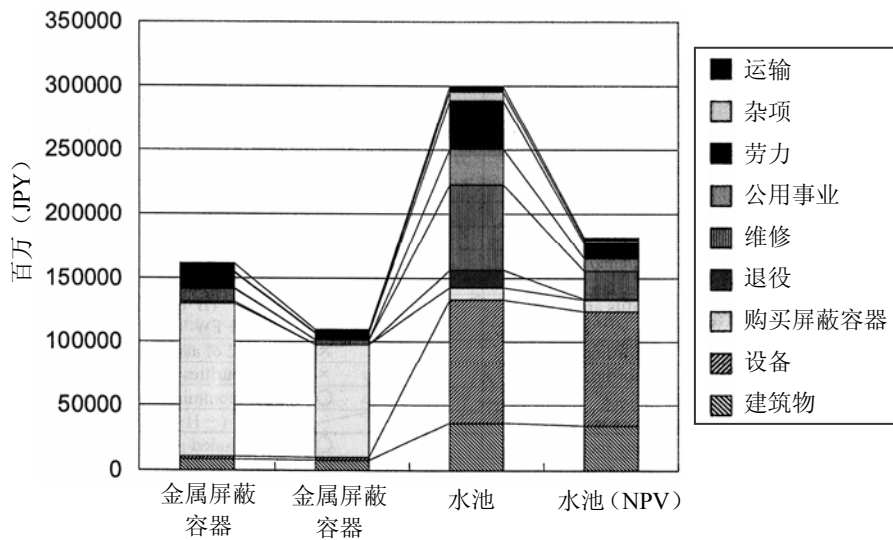


图 3 5000 tU 贮存设施的成本数据^[13]。

- 通过总的和单位的容量的扩大,由于性能的改进而使经济获得改进;

- 由于共有资源和机遇的分摊使用,通过性能有效性的改进而带来的经济改进;

- 在工作中学习的结果,通过积累经验和(研究、发展和设计

(RD&D)工作改进实绩,而使性能获得改进。

在乏燃料贮存领域的相干情况已经讨论了这些方面^[15-18]。图4示出在美国的过去,随着时间的推移容器单位的容量提高而改进贮存效率的情况^[19]。还需要开展进一步的工作来全面涉及乏燃料贮存的技术特征并最终有能力准确地预测成本的进一步减少。

3.3 乏燃料管理系统的战略规划

贮存需求应按时进行规划以计划贮存设施:虽然此类工具有直接分析乏燃料贮存的经济,但它在确定打算评估的贮存项目和先决条件还是重要的。作者已经开发了一体化的分析工具 SFTRACE (乏燃料贮存、运输和费用评价系统)^[20]。该模型涉及日本的所有核电系统以及从核电厂到 AFR 贮存库的运输,从核电厂到后处理设施,从 AFR 贮存库到后处理厂。SFTRACE 已开始于每个核电厂以国家的核电生产和 Pu 再循环战略为基础,接着对乏燃料进行平衡计算。如果发现乏燃料库存量超过水池能力,则必须增加库存能力。在完成物料平衡的基础上,要进行成本评估,以得出总的乏燃料管理成本(即总贮存成本和运输成本)。

在另一篇论文中^[20];可以找到用 SFTRACE 进行各种贮存战略的经济比较的一个例子。

3.4 在乏燃料贮存服务中私人投资的项目财务分析

在确定一个项目的实际投资时,必须评价总的财务健康情况。此分析所需的软件可以从商业成套设备中获得帐户型部件。不过在乏燃料贮存项目中应用可能需要找出乏燃料贮存事务中的具体特征。作者的观点是,关键点是贮存服务的价格。

作为前文描述的 SFTRACE 软件的扩展,作者开发了项目的财务评估工具^[21]。表2列出此工具涉及的成本项目与常规的工程-经济成本估算之间的差异(典型值见图1和图2)。要进行投资和国家或地区有关投资立法以及制度管理的法规和规则的需求是大量的和比较具体的。表2中的 EEC 为欧洲经济共同体, PFA 为项目财务分析。

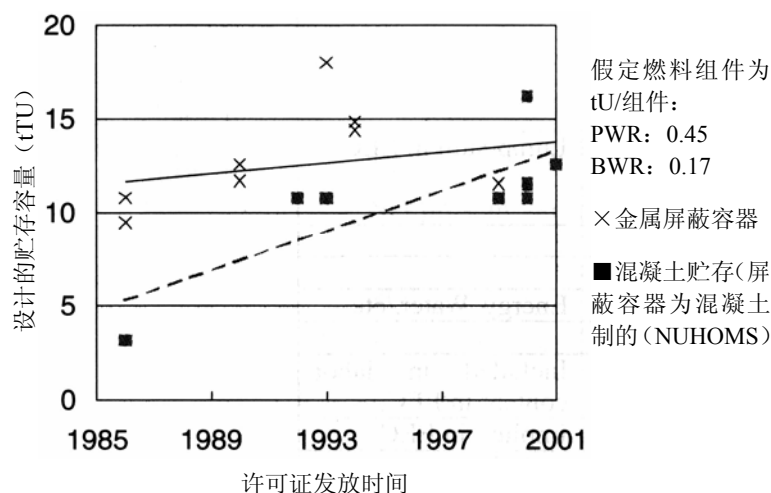


图4 涉及技术改进的工作;美国经历的每个容器的单位容量^[19]

表 2 一个私营公司的工程经济成本计算 (EEC) 和项目财务分析 (PFA) 涉及的成本项目比较

项 目			EEC	PFA	备 注
A.	运行损益	销货收入	×	○	
B.		生产成本	见下面的表格		
C.		管理和营业费	见下面的表格		
D.	非运行损益	利息, 股息	×	○	收入
E.		融资成本	×	○	支出
F.		杂项	×	×	
G.	普通运行损益				$(A - (B+C)) + (D - (E+F))$
H.	意外损益	意外收益	×	×	销售资产, 等等
I.		意外损益	×	×	销息证券, 等等
J.	转为准备金		×	○	退役
K.	税前净损益				$G - (-H+I+J)$
L.	税	公司所得 税	△	○	包括在 EEC 劳务费中
		居民税	△	○	
M.	税后净损益				$K-L$
N.	上期结转				
O.	本期未分配的利润				$M+N$
P.	净收入的分配	股利	×	○	
		奖金	×	○	
		盈余	×	×	
Q.	向下期结转				$O-P$

项 目			EEC	PFA	备 注
B	生产成本	劳务费 (工资, 奖金, 退休金, 社会保险)	△	○	包括在 EEC 总计中
		材料	○	○	
		修理, 维护	○	○	
		公用设施	○	○	能源, 水, 等等
		退役	○	○	
		保险	△	○	包括在 EEC 劳务中
		折旧	△	○	在 EEC 中未讲明
		税和公共费用	△	○	包括在 EEC 的劳务费中
C	管理和营业 费	劳务费 (工资, 奖金, 退休金, 社 会保险)	×	○	EEC 中未考虑
		领导报酬	×	○	
		交通旅行	×	○	
		消耗品	×	○	
		年贡, 租金	×	○	
		杂项	×	○	
		折旧	×	○	
税和公共费用	×	○			

○: 估计直接付款 △: 估计包括的 ×: 未考虑

表 3 和 4 列出在评定投资的有效性和实绩时的性能指标。表 3 和 4 中的变数符号的表示法见表 5。表 6 列出用于下列数字实例的初步数据的参考值，其中大部分取自日本的法规和经验。

表 3 财务分析中的短期性能指标

特征	指标	计算/公式	判断准则
获利能力 —公司竞争能力	毛利率	$= \frac{\text{普通损益}}{\text{销售收入}}$	不显著低于可替代业务机遇
	从开始运行到第一次获利的的时间	$= t (0 < [\text{税后利润}]) - t_0$	业务活动开始后 7 或 8 年
	从开始运行到第一次获剩余利润的时间	$= t (0 < [\text{剩余利润}]) - t_0$	少于设施和设备的平均法定期
清偿能力 —资金增加能力分析	衡平权比率	$= \frac{\sum_{t=1}^{t_2} (I_t + E_t)}{\sum_{t=1}^{t_2} (I_t + F_t + E_t)}$	研究中假定为 20% 常数
	固定资产比率	$= \frac{[\text{固定资产}]}{\text{自有资本净值}}$	不显著低于可替代业务机遇
其他 —财务管理原则	工作资金短缺	$= [\text{业务活动的净现金}] + [\text{财务活动净现金}]$	$[\text{每年末尾现金和相当现金}] \geq 0$
	破产	$= [\text{总资产}] - [\text{总负债}]$	$[\text{总资产}] - [\text{总负债}] \geq 0$

表 4 财务分析中的长期性能指标

特征	指标	计算/公式	判断准则
吸引力	NPV: 净现值	$= \sum_{t=1}^{t_2} \frac{(Pn_t + Dp_t)}{(1+i)^{(t_0-t)}} - \sum_{t=1}^{t_2} \frac{(As_t + Ao_t)}{(1+i)^{(t_0-t)}}$	$[\text{NPV}] > 0$
	ROI: 投资收益	$= \sum_{t=1}^{t_2} \frac{(I_t + F_t + P_t)}{(1+i)^{(t_0-t)}} = \sum_{t=1}^{t_4} \frac{(D_t + R_t)}{(1+i)^{(t_0-t)}}$	ROI > WACC: 资本成本的加权平均 $\text{WACC} = \frac{D_t + R_t}{\sum_{t=1}^{t_2} I_t + F_t}$

表 5 变量符号表示法

变量	注释	单位
T	贴现的现金流量率	—
I _t	年度 t 投资	货币 (例如, 日元)
D _t	年度 t 股利	货币 (例如, 日元)

变量	注 释	单 位
Dp_t	年度 t 折旧	货币 (例如, 日元)
t	时间	(日期)
t_0	贴现参考日期 (年)	(日期)
t_1	开始投资和借贷日期	(日期)
t_2	终止投资和借贷日期	(日期)
t_3	股息和付还开始日期	(日期)
t_4	股息和付还终止日期	(日期)
R_t	t 年的长期债务付息 (税后)	货币 (例如, 日元)
F_t	t 年长期债务净增	货币 (例如, 日元)
Fr_t	t 年总的长期债务	货币 (例如, 日元)
B_t	t 年长期债务	货币 (例如, 日元)
P_t	t 年现金和相当现金的净增	货币 (例如, 日元)
Fr_t	t 年的的税后损益	货币 (例如, 日元)
E_t	t 年用现金和相当的现金采购的固定资产	货币 (例如, 日元)
As_t	t 年购买的固定资产	货币 (例如, 日元)
Ao_t	t 年流动资本的需求	货币 (例如, 日元)

表 6 有关评定私营业务倡议的参考初步数据

项 目	股息率		备注		
筹资成本	股息	股息:	10%		
	利息	长期债务	利率:	4.0%	
		短期债务	利率:	5.0%	
生产成本	折旧	折旧法: 固定%	耐用年		
	责任保险	耐用品: 见法律		建筑物 38	
		由核损害赔偿		假设非寿期保险是相当的	
		法管理		保险: 120 亿元	
	非人寿保险	索赔量:	0.1%		
公司所得税		0.05%			
税	国家的	核财产保险		覆盖的最大量: 2.5%	
		保险费率	0.1%		
	地区的	税率:	30.0%	标准税率	
		消费税	税率:	5.0%	包括地方率
		居民税	税率:	12.3%+5.0%	标准税率
营业税	税率	5.0%, 7.3%, 9.5%	根据收入, 标准税率		
固定资产	税率:	1.40%	标准税率		
一般管理	生产成本的资本率	24.0%	所有工业的 10 年平均		
费	(税后):		值		
储存量的	每个运行期总退役费用				
增加	相等的分配				
投资收益 (得到	投资收益	0.54%	存据 (1997—1998)		
的利息					

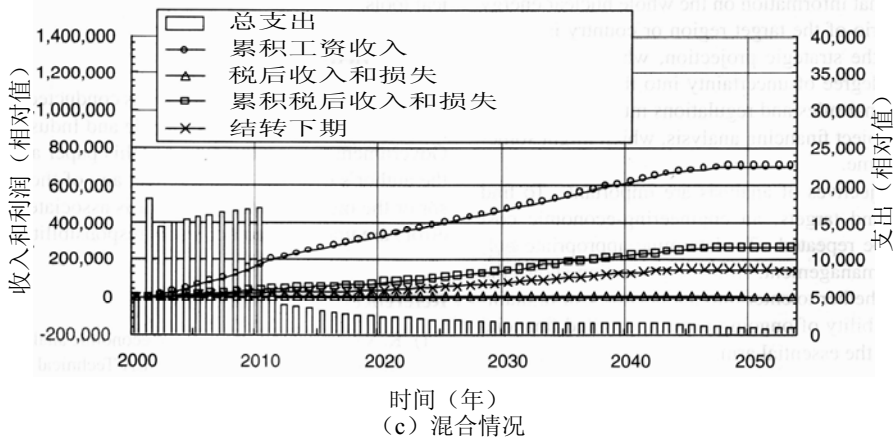
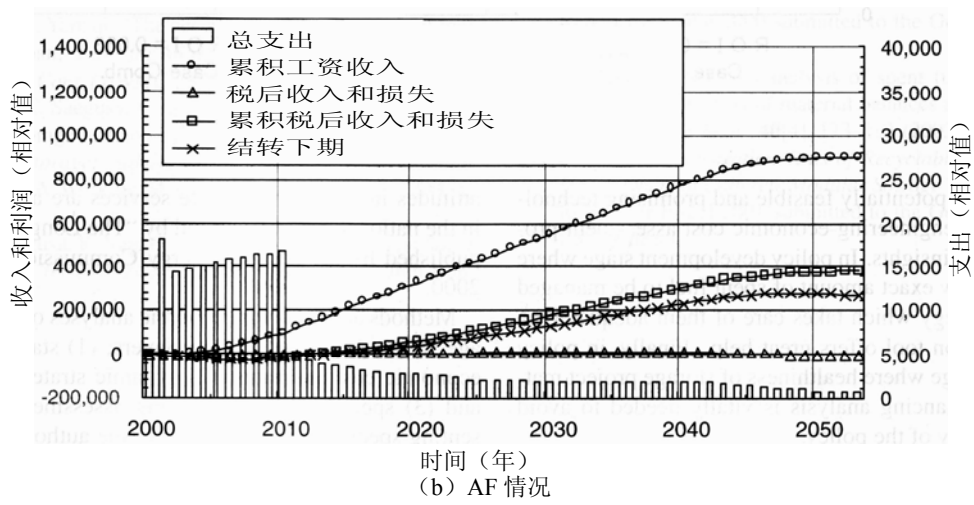
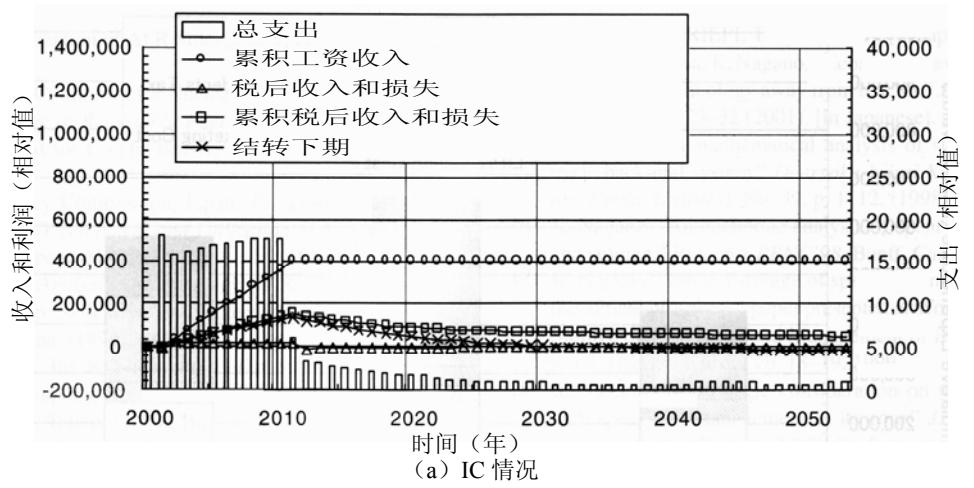


图 5 贮存财务分析

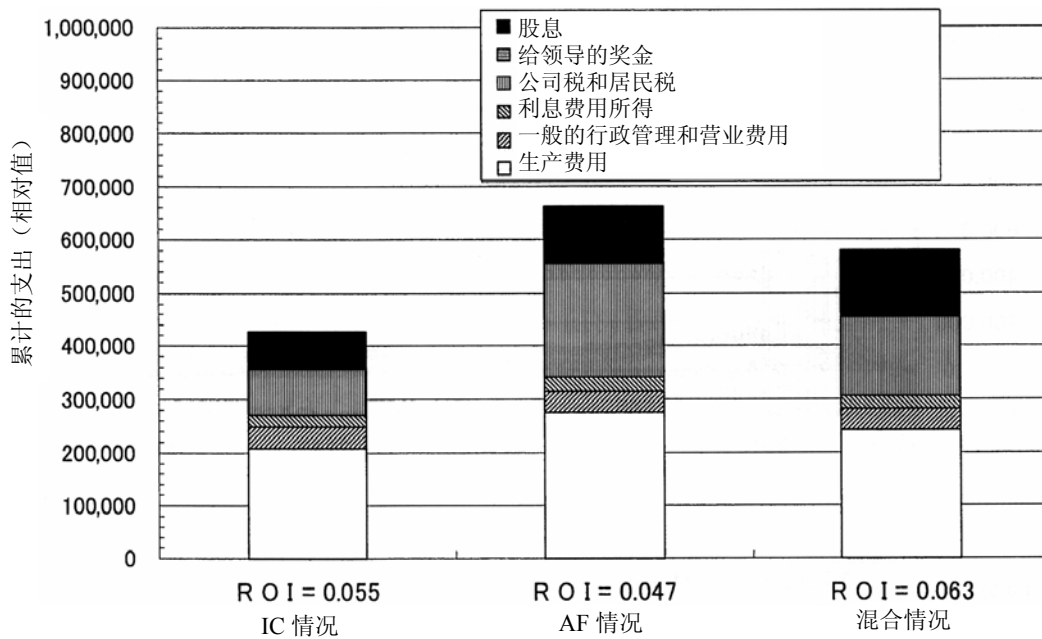


图 6 总成本的比较

实例的计算基于图 2 的 5000 tHM 容量的金属屏蔽容器的实例的工程-经济条件。价格方案集中于私营有限公司的贮存服务。在确定贮存服务价格时，人们可以选择下列两个因素的任一组合。

—IC，为贮存设施一次接收乏燃料所支付的初始固定费用（日元/tHM），

—AF，为单位贮存燃料的年度费（日元/tHM/a）。

为了探讨表 3 和表 4 所列短期的和长期准则都能得到满意的结果的几个可替代方案，曾做过一些计算。表 7 简要列出求出的模拟的服务价格。因为此示范计算具初步性质，所以引用的数据为绝对值而不是有意义的平均值。

示于图 5 (a) — (c) 的结果是整个计算的财务性能和健康检查。如果价格水平保持在规划是可行的和有生命力的，那么分析就要找出价格的范围。图 6 示出图 5 (a) — (c) 中每个的总成本。

因为乏燃料贮存业务的资本投资有利息，所以 AF 情况或道路以外的停车场“将使运行的早期出现大的亏损。如果试图用提高年度价格来加以缓解，那么在以后的时间将产生过多的收益。对于资金问题，我们可以实施一种策略，例如对于屏蔽容器，可以采用租借，而不采用购买的方法。

表 7 确实贮存服务价格的实例

实例号	IC[10 ⁶ JPY/tHM]	AF[10 ⁶ JPY/tHM/yr]	备注
IC	100%	0%	一次总支付
AF	0%	100%	Parking-lot
混合的	30% IC	根据情况调整	

结论

本文首先讨论了日本乏燃料管理的最新立法和制度发展情况，并考查了在这些环境下贮存乏燃料的经济分析方法。日本国会已经通过可再循环资源的贮存的商业运行，并修改了有关法律。日本原子能委员会 2000 年 12 月发表了“长期计划”的国家政策。

乏燃料贮存的经济分析的方法和工具被分为三个层次：（1）静态工程经济成本估算；（2）动态战略评估；（3）具体项目财务评估。作者在提出每类实例之后指出有可能将这些方法扩展为更大适于可能的应用。

参考文献

- [1] K.Nagano, “Methodologies of economic analyscs of spent fuel storage”, paper presented at IAEA Technical Meeting on Economics of Spent Fuel Storage, St. Petersburg. Russia, Sept. 9-12, 2002.
- [2] Atomic Energy Commission, Japan, *The Long-term Program of Development and Utilization of a Nuclear Energy*, (1987),[in Japanese].
- [3] Atomic Energy Commission, Japan, *The Long-term Program of Development and Utilization of a Nuclear Energy*, (1994),[in Japanese].
- [4] The Steering Committee for Nuclear Energy, *On Interim Storage of Spent Nuclear Fuel*, Interim Report to the Council for Comprehensive Energy Policy, (1997), [in Japanese].
- [5] The Taskforce for Spent Fuel Management Measures, *Systems Analysis of Spent Fuel Management in Japan*, (II) Towards Realization of AFR Storage of Spent Fuel, (1998), [in Japanese].
- [6] The Steering Committee for Nuclear Energy, *Towards Realization of Storage of Recyclable Fuel Resources*, Interim Report to the Council for Comprehensive Energy Policy,(1998), [in Japanese].
- [7] Atomic Energy Commission, Japan, *The Long-term Program of Development and Utilization of a Nuclear Energy*, (2000),[in Japanese].
- [8] IAEA, *Cost Analysis Methodology of Spent Fuel Storage*, Technical Rep. Series No. 361, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1994).
- [9] T.Saegusa, C. Ito, K. Shirai, *et al.*, *Dry Storage Technologies for High Burnup and MO_x Spent Fuels*, Summary Report No. U27 CRIEPI, Tokyo, (1999), [in Japanese].
- [10] K.Yamaji, K. Nagano, T.Saegusa, *Economic Comparison of Spent Fuel Storage Technologies*, Research Rep L87001, CRIEPI, Tokyo, (1987), [in Japanese].
- [11] K. Nagano, K. Yamaji, “The needs and economics of spent fuel storage in Japan,” *Proc. For*

- ASME/JSME/AESJ Joint Int. Waste Management Conf. (JIWMC), Kyoto, Japan, (1989).
- [12] K. Nagano, T. Saegusa, C. Ito, et al., "Economic analysis of spent fuel storage technology in Japan," IAEA-SR-171/22, in *Spent Fuel Storage: Safety, Engineering and Environmental Aspects*, IAEA Working Material No. IAEA-SR-171, IAEA, (1990).
- [13] C. Ito, T. Saegusa, K. Nagano, *Economical Evaluation on Spent Fuel Storage Technology away from Reactor*, Research Rep. No. U99047, CRIEPI, Tokyo, (2000), [in Japanese].
- [14] C. Ito, T. Saegusa, K. Nagano, "Economical evaluation on spent fuel storage technology away from reactor," *J. Nucl. Fuel Cycle Environ.*, 8[1], 25-32(2001), [in Japanese].
- [15] K. Nagano, "A mathematical analysis of storage in the fuel cycle back-end system," *Denryku-keizai Kenkyu (Economics and Public Utilities)*, No. 39, P. 1-12, (1998), [in Japanese].
- [16] K. Nagano, "An economic analysis of spent fuel management and storage," *Proc. For PBNC'98 Banff*, Canada, (1998).
- [17] K. Nagano, "Interim storage of spent fuel in Japan-Facts and theoretical prospects," paper presented at Workshop on Interim Storage of Spent Fuel and Management of Excess Fissile Material, Harvard Univ., Feb. 18-19, 1999.
- [18] K. Nagano, "A strategic consideration on nuclear fuel cycle with spent fuel management as its core," *J. Nucl. Fuel Cycle Environ.*, 8[2], 135-144(2002), [in Japanese].
- [19] CRIEPI, *Demonstration Tests of Recyclable Fuel Resources-Development of Concrete Modular Storage Technologies*, Final Report for Fiscal 2000 submitted to the Government, (2001), [in Japanese].
- [20] K. Nagano, "Systems analysis of spent fuel management in Japan (1); Projection of material balances and storage needs," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 40[4], 173-181 (2003).
- [21] CRIEPI, *Demonstration Tests of Recyclable Fuel Resources-Development of Concrete Modular Storage Technologies*, Final Report for Fiscal 2001 submitted to the Government, (2002), [in Japanese].

摘要

本《标准》为含钷 30 wt%以上并含铀的钷金属和钷氧化物的稳定、包装和安全贮存提供了指导。它取代了 DOE-STD-3013-99 标准，并被批准用于 DOE 所有机构及其承包商。利用去除液体和腐蚀性产物稳定金属；利用在高温条件下在空气中加热来稳定氧化物。本《标准》还包括对贮存容器设计、建造和测试的要求，规定了贮存容器的负荷限值以及包装过程与安全相关的要求。概述了贮存期间对包装物监督的主要要求；详细阐述了对保存记录的要求。

前言

1. 本《标准》取代了 DOE-STD-3013-99 标准“含钷材料的稳定、包装和贮存”，并被批准用于 DOE 所有机构及其承包商。本《标准》涉及含钷材料的稳定、包装和贮存。

2. 有益的评论（建议、补充、删减）和可能会改进本文件的相关资料，应该寄往技术标准项目办公室。

3. 本《标准》这样的 DOE 技术标准没有推定要求，然而 DOE 标准中的所有规定或部分规定可以在下述条件下成为要求：

(1) 文件中明确以要求陈述的；或

(2) 合同中或在由 DOE 要求文件中要求的执行计划或项目计划中承诺遵守该《标准》。

4. 贯穿本《标准》始终，“shall”一词用于指如果要满足本《标准》的目的所必须实施的行动。如果本《标准》的规定通过上述讨论的方法之一成为要求，那么“shall”的陈述就成了要求。

5. 评价或论证的要求应该递交给，阿尔伯克基运行管理局核材料库存管理项目办公室（NMSPO）：对一种用于稳定核实的可选分析方法的技术评价；对减少稳定材料测试要求的合格程序的技术评价；论证建议的可选标准或可选方法满足一个或多个标准，从安全角度它在技术上与本《标准》是相当的；或在严格控制条件下，对定义明确的范围扩展做技术评价。

核材料库存管理项目办公室将向负责制定要求的 DOE 官员提供一个 DOE 批准的建议。

6. 《标准》的责任已指派给环境管理计划，由核材料库存管理项目办公室实施执行措施。在上面第二条中提供给技术标准项目办公室的评论和数据，还应该送交核材料库存管理项目办公室。有关本《标准》的问题应该向核材料库存管理项目办公室提出。对本《标准》的任何（修正或变动通知）修改，必须通过核材料库存管理项目办公室提交给环境管理局。

1 范围

本《标准》为将 DOE 设施中含钚材料稳定成安全可靠的形式提供了标准，做到稳定后的钚在包装后能贮存 50 年而所需的监督最少。本《标准》适用于至少含钚 30 wt% 并含铀的钚金属和钚氧化物。对于浓缩铀金属，钚含量必须高到橡树岭 Y-12 厂不可接受的程度。作为含大量铀的氧化物材料的实际限值，钚含量必须大于试用的保障终止限值。对于铀没有较低的限值。本《标准》不适用于预定要运往废物隔离中试设施（WIPP）的材料，例如钚残渣或超铀（TRU）废物；辐照过的燃料；密封源；含铀-233 在 0.5 wt% 以上的材料；或钚溶液。

DOE 钚氧化物存量很大一部分含氯化物。例如草酸盐沉淀的氧化物产物可以含有百分之几的氯化物。即使氯化物含量较低，也会催化不锈钢发生应力腐蚀裂纹，不锈钢是本《标准》中规定容器使用的材料。本《标准》没有对氯污染强加一个限值，因为腐蚀程度是由存在的水分而不是由存在的氯化物决定的。在本《标准》中充分考虑了对水分含量的限制，以避免大的腐蚀。

本《标准》涉及贮存货包的安全包覆层。DOE 其它指令（例如政策和条例）和其它机构条例详细阐述了贮存设施设计、保障和保安界面和运输要求，在本《标准》中就不重复这些要求了。但是，建议本《标准》的使用者在执行这些标准时参考并保证遵守其它适用指令。

2 目的

这些标准为保证含钚材料将以稳定形式在 DOE 设施中装在可靠的货包里安全、长期贮存，并且在最终处置前预期的装卸、运输和贮存条件下，所需要的监督最少提供了基础。

3 适用性

所有 DOE 组织及其承包商可以使用本《标准》。

4 缩写词和定义

4.1 缩写词

ANSI（American National Standard Institute）——美国国家标准学会

ASME（American Society of Mechanical Engineers）——美国机械工程师学会

CFR（Code of Federal Regulations）——联邦法规汇编

DOE（United States Department of Energy）——美国能源部

IDC（Item Description Code）——物项描述规则

LOI（Loss on Ignition）——灼热损失

MBA（Material Balance Area）——材料平衡区

MC&A（Materials Control and Accountability）——材料控制与衡算

TID（Tamper Indicating Device）——篡改指示装置

TRU（Transuranic）——超铀

4.2 定义

设计压力：密封容器指示其有能力承受内部增压的一个特征。在 ASME《锅炉和压力容器规则》术语中，该定义是“最大容许工作压力”。

组装燃料：由完全装在包壳（包括端部配件）内的含钚材料构成的核反应堆燃料元件（细棒、平板、组件等），制造质量很高，并有很好的质量保证。

自由气体容积：密封货包的一部分，可以填充气体并容纳贮存期间产生的气体。

辐照过的燃料：包括组装燃料的核材料，以其现有形式，在反应堆中或加速器上受到辐照，从而释放出需要特殊包容和处理的外照射剂量。

灼热损失：称过重量的样品在空气中被加热到 1000℃ 至少 1 小时后测得的质量损失，以测量由残留挥发性核素引起的重量变化。

材料温度：在某一质量的加热材料中的最低温度。换句话说，所有材料在此温度上或高于此温度。

氧化钚：伴随有非钚组分曾暴露在氧化环境下的氧化物。非钚组分包括其它锕系元素（例如铀和钚）和化合物（例如氧化镁和氯化钠），它们是由在钚或燃料加工中使用的化学物质产生的。

货包：本《标准》要求的容器组装联合体（一个内容器和一个外容器），连同盛装的含钚材料以及任何含钚材料装在其中的额外内部筒装容器。

保障终止限值：在满足 DOE 条例 5633.3B 第一章第 1.1 节中条件的情况下，可以终止材料控制与衡算以及实物保护的最大钚浓度。如果在参考文献以外的保障导则适用于一个或多个场址，那么管理导则必须适用于包装场址。

稳定化材料：由于在 50 年的设计寿期中产生压力、腐蚀或过多应力，而不会使本《标准》中描述的容器超过设计基准，而且在重新开启该容器时，在空气中也不会发生反应。

5 稳定、包装和贮存标准

5.1 稳定化材料

由于金属、氧化物和工程材料在化学和物理性质上（以及在加工方法上）有很大差别，因此为每种类型的材料提供了标准。

5.1.1 含钚金属与合金

1. 要包装的金属件每个必须至少重 50 g。根据本《标准》，不得包装金属箔、铍屑和金属丝。

2. 在包装时，从表面上看金属没有非附着腐蚀物（包括氧化物）、液体和有机材料，例如塑料和油。

3. 根据本《标准》的规定，不得贮存用钚铍屑压制成的团块。

5.1.2 氧化物

1. 稳定条件：必须将材料在氧化环境下加热到至少 950℃的材料温度足够长的时间（不少于 2 小时）来稳定氧化物，以满足 6.1.2.3 中的稳定标准。

2. 稳定确认：必须用下述的一种方法保证要包装的材料满足 6.1.2.3 中的标准：

1) 稳定测试：对于已经稳定过的材料，必须用技术上验证试用过的方法（例如灼热损失）测量它们的水分含量。必须用前言第五条中描述的程序获得对灼热损失以外的方法的批准。

2) 程序合格判定：用合格程序稳定和包装的材料必须符合简化的测试要求。所谓合格程序就是经过验证的、令前言第五条中提到的独立审查小组满意、在生产环境下一直生产满足 6.1.2.3 标准要求的包装用材料的程序。一旦判定该程序是合格的，那么正如在 6.1.2.2.1 中描述的，仅要求在有必要显示继续控制程序的程度上进行材料测试。

3. 稳定验收标准：在任何形式的密封容器中包装的氧化物的水分含量（如果用灼热损失方法就是重量损失），在包装时必须小于 0.5 wt%。

5.1.3 工程材料

1. 未辐照的组装燃料，由烧结的覆以质量保证的锆合金或不锈钢的铀-钍氧化物芯块组成，保证燃料完整性的监督记录满足 6.1.2 节的所有要求，就无须进行额外的稳定或测试。从这种燃料中分离出的燃料芯块也被认为在它们稳定成形时满足 6.1.2 节的所有要求。有类似包覆完整性保证的包覆金属燃料也被认为满足 6.1.1 节的所有要求。

2. 满足 6.1.2.3 标准的烧结的铀-钍氧化物燃料未包覆芯块，无须进行额外的稳定就被认为符合 6.1.2 节的要求。不能满足 6.1.2.3 标准要求的烧结的铀-钍氧化物芯块必须根据 6.1.2.1 标准进行稳定，并且在包装前必须满足本《标准》6.1.2.3 标准。

5.1.4 稳定后贮存

先前按 6.1.2.1 标准中的规定进行过稳定的延迟包装氧化物，在稳定时满足 6.1.2.2 和 6.1.2.3 中规定的测试和稳定标准，并放入一个封闭的容器中（例如一个筒装罐），该筒装罐可以装入本《标准》描述的内容器和外容器，无须进行额外的稳定，前提是容器和内装物没有改变，而且水分含量低于 0.5 wt%。水分含量可以确定，例如，在装入内容器时测量，或在稳定之后和装入内容器之前的重量增加加到稳定时的水分含量上。

5.2 容器—包装物

5.2.1 容器设计概念

1. 容器组件最少必须含有两个单个密封的嵌套容器，以便将贮存材料同环境隔离。外容器提供了防止内装物释放的压力边界。内容器提供了一个附加的隔离边界和一个内压指示器。内容器和外容器必须用焊接的方法密封。可选择使用额外的密封或不密封内容器（有时称为材料容器或筒装容器）。

2. 内部容器¹尺寸必须适合与其相配套的外容器，并为紧接的外容器的焊接留有足够的间隔。

¹ 内部容器一词指的是内容器和任何筒装容器。

3. 外容器和内部容器都必须容许做非破坏性内装物核实、检查和监督（例如用射线照相法和称重法）。

4. 内容器必须容许非破坏性指示小于 790 kPa 的内部压力的累积。

5. 外容器最小设计压力必须是 4927 kPa。

6. 外容器必须设计成能满足 DOE 条例 440.1A 附件 1 第六节概述的要求，并且必须达到指定的安全等级。

5.2.2 容器制造

1. 内容器和外容器都必须用易延展、防腐蚀材料制造，例如 300 系列的不锈钢或其它性能（强度、防腐蚀等）同等或更好的材料。封闭焊接必须采用使不锈钢对应力腐蚀裂纹敏感度最低的程序。任何额外的内部容器必须用与内容器和外容器同等材料制造。

2. 无论是外容器还是内部容器在其制造中不得包含易燃或有机物质。另外，不管是人造橡胶还是垫圈都不得用于任何容器，包括筒装容器。

3. 已装料的且装配好的外容器必须是符合下述尺寸的合适的圆柱体：

1) 内径为 126 mm；

2) 内高为 255 mm。

5.2.3 容器测试标准

1. 设计合格测试

1) 按照 ANSI N14.5 所限定的，在货包（外容器、内容器和模拟内装物）从 9 m 高处下落到一个平坦的、基本上不可压缩的和水平的表面上之后，外容器必须保持密封性。下落试验必须根据 49 CFR 178.603 适用部分中规定的试验程序进行，并且必须使用 49 CFR 178.601 规定的容器，装填非放射性材料，模拟货包计划装填情况。

2) 按照 ANSI N14.5 所限定的，在容器（包括模拟内装物）从 1.3 m 高处下落到一个平坦的、基本上不可压缩的和水平的表面上之后，内容器必须保持密封性。下落试验必须根据 49 CFR 178.603 适用部分中规定的试验程序进行，并且必须使用 49 CFR 178.601 规定的容器，装填非放射性材料，模拟容器计划装填的情况。

3) 按照 ANSI N14.5 所限定的，在 1.5 倍于设计压力下进行流体静力学试验之后，外容器必须保持密封性。试验必须使用 49 CFR 178.601 规定的容器。

2. 使用期间的测试

按照 ANSI N14.5 所限定的，内容器和外容器都必须在封闭时测试密封性。

5.2.4 其它标准

1. 内容器和外容器都必须有独一无二的永久性识别标记，例如蚀刻的或雕刻的。

2. 外容器的外表面在组装和封闭时不得超过 10 CFR 835 附件 D 规定的可去除的表面污染值。至少在内容器装入之前，外容器的内表面同样必须是无污染的。内容器外表面上可去除的表面污染水平在内容器装入外容器时必须达到合理可行尽量低，而且不得超过 2000 dpm/cm²。

5.3 内装材料

5.3.1 容器填充气体

1. 任何容器（包括筒装容器，如果使用的话）内的气氛不得与容器或内装材料发生不利的反应。
2. 内容器和外容器内的气氛不得妨碍容器的密封性试验。

5.3.2 内装材料的质量

1. 金属或氧化物内装物中钚和其它易裂变核素的总质量不得超过 4.40 kg。货包内装物（无论是金属还是氧化物）的总质量不得超过 5.00 kg。
2. 必要时，6.3.2.1 标准规定的质量必须减少，以保证内装材料的释热率在贮存期间的任何时候都不会超过 19 W。
3. 必要时，内装材料质量必须进一步加以限制，以保证计算的边界压力小于外容器设计压力。或者，货包的自由气体容积对于氧化物必须在 0.25 L/kg。

5.3.3 包装程序

1. 明显的容易移动的残存物质，像金属紧固件和其它碎片必须在包装前从材料上移走。
2. 为稳定核实而采集的氧化物样品必须是具有代表性的在包装时放进密封容器要稳定的材料。如果该材料要在包装前贮存一段时间，而且 6.1.4.1 标准的规定适用，那么样品必须是具有代表性的要放入封闭容器的材料。
3. 内装材料不得具腐蚀性或严重影响内容器或外容器的结构完整性。
4. 只有相似的材料才能混装在一个内容器或筒装容器和货包中贮存。

5.4 贮存—安全监督贮存的货包

5.4.1 监督计划

1. 监督计划必须涉及具体场址的运行条件和质量保证方法。
2. 场址监督计划必须详细说明：
 - 1) 明确限定的方法（可能包括统计测量、预期的失效率、对货包内装物的内在危险和其它危险的考虑，以及工程学判断），利用该方法必须确定货包的选择、频度和样品尺寸，并且可以调整；
 - 2) 初始监督频度（或两次检查的间隔时间）；
 - 3) 要调查货包样品的初始尺寸和成分；和
 - 4) 对评价观察到的非正常行为或不曾预料到的情况的规定。
3. 监督计划规定的监督必须包括：
 - 1) 在货包封闭的 30 天内初始基线货包检查；
 - 2) 在整个贮存期间定期监督，收集货包性能和/或容器及其内装物行为的信息。在观察货包行为的基础上，随着时间的推移可以调整详细审查标准。

4. 场址监督计划必须用文件证明安全检查/监督方法和责任。
5. 场址监督计划必须要求下述程序：
 - 1) 确定监督的前提条件（即一定要采取的行动或在检查前一定要达到的条件）；
 - 2) 确定验收标准，并在没有满足标准时，为采取行动提供指导；和
 - 3) 建立并保持文件形式的安全监督时间表。

5.4.2 监督参数

非破坏性货包调查必须包括下述参数：

1. 在内容器中累积内压的指示。
2. 在监督样品中每个货包的重量。
3. 泄漏和/或降质的指示。

5.4.3 评价监督数据

1. 检查的监督数据必须与基线测量相比较，以确定任何变化。
2. 如果任何时间在货包中发现未预料到的变化，必须进行评价，并在必要时采取纠正措施。必要时该评价必须包括：1) 打开货包的选择方案，2) 根据诸如内装物、来源和封闭日期考虑检查其它类似的货包，3) 评估可能的后果。

5.5 文件管理

5.5.1 数据库

必须保持一个电子数据库，作为贮存材料和货包相关信息的一个来源。该数据库可以由几个文件组成（这些文件本身也可以是数据库），其中一些可能是保密的。为了完整性，该数据库与材料控制与衡算（MC&A）数据库是同一等级的，而且一般是兼容的。

5.5.2 数据库内容组成

1. 数据库至少必须包括有关下列材料特征信息：
 - 1) 化学形式和物理形式；
 - 2) 最容易得到的包括铀系同位素分布以及分析的有效日期
 - 3) 材料含量的数量（质量）
 - 4) 材料稳定核实的条件，包括试验结果（如果稳定和包装采用了合格程序，那么该条目必须是在合格确认试验中得到的平均值和标准偏差以及最近 3 次为过程控制对材料进行的测量结果）；
 - 5) 贮存材料的来源（例如，材料产生的场址、设施和材料平衡区（MBA）以及美军的信息与指挥中心），前提是能够得到这方面的信息；
 - 6) 具体的稳定条件包括日期、温度、加工时间和使用的设备和气氛（若适用，采用合格程序的注释）；
 - 7) 材料的粒子密度和测定的方法，利用该方法或参照一个模型论证在确定装载质量限值上不需要这类信息；和
 - 8) 与预期的有杂质数据源的主要杂质这类内容相关的其它信息（例如工艺知识、破坏

性分析或 X 射线荧光分析)。

2. 数据库最少必须包括对下述货包特征的识别：
 - 1) 每个容器在密封上的名义填充气体组成 (例如空气、氦或氩);
 - 2) 货包中外容器和内容器泄漏试验数据记录;
 - 3) 货包布置—货包中容器的数量和类型;
 - 4) 每个容器的包装日期;
 - 5) 初始辐射场 (接触点和 300 mm 处的中子和 γ), 包括是如何测量的;
 - 6) 基线货包总重、尺寸和皮重;
 - 7) 与每个容器相关的独一无二识别数字和 TID 数字 (如果有的话);
 - 8) 每个容器的制造商批号识别数字。
3. 数据库最少必须包括: 下述监督和检查记录:
 - 1) 监督结果
 - 2) 进行的测试记录
 - 3) 检查日期;
 - 4) 执行检查的人员姓名
4. 数据库最少必须包括贮存材料在贮存设施中的具体位置。

5.6 质量保证

根据场址质量保证计划必须执行满足 10 CFR 830.120 的质量保证。作为场址质量保证计划的一部分, 场址负责保证按照本《标准》正在被包装的氧化物是用材料识别和监督计划中积累的信息描述的。

参考文献

- [1] 10 CFR 830.120, Nuclear Safety Management, Quality Assurance Requirements
- [2] 49 CFR 178, Specifications for Packagings
- [3] ASME Boiler & Pressure Code, Section VIII, July 1, 1998
- [4] ANSI N14.5-97, Standard for Radioactive Materials - Leakage Tests on Packages for Shipment,
- [5] American National Standards Institute, Inc., New York, NY, 1997
- [6] DOE Order 440.1A, Worker Protection Management for DOE Federal and Contractor Employees, March 27, 1998
- [7] DOE 5633.3B, Control and Accountability of Nuclear Materials, September 7, 1994.
- [8] Additional Attractiveness Level E Criteria for Special Nuclear Material (SNM), Edward J.
- [9] McCallum (USDOE/NN51), July 22, 1996
- [10] DOE-STD-1098-99, Radiological Control, July 1999
- [11] Y/LB-15, 920/Rev. 1, Criteria for Acceptance and Technical Assessment for Acceptance of Enriched Uranium at the Y-12 Plant, March 1997

内部资料
注意保存

乏燃料管理及后处理

第 5、6 期（总第 131、132 期）

目 录

乏燃料管理

- 日本乏燃料管理系统分析：(I) 对材料平衡和贮存需要的预测…………… (9)
日本乏燃料管理系统分析：(II) 乏燃料贮存的经济分析方法学…………… (14)

法规与标准

- 美国能源部标准：含钚材料的稳定、包装和贮存…………… (26)

核工业集团公司四〇四厂
核科技信息与经济研究院
二〇〇三年十月