

使用済燃料敷地外貯蔵技術の経済性評価

伊藤千浩^{*} 長野浩司^{**} 三枝利有^{*}

使用済燃料発電所敷地外貯蔵に関し、キャスク貯蔵とプール貯蔵技術の経済性評価を行った。経済性の指標は、使用済燃料を貯蔵施設へ搬入した時点で貯蔵料金を払うという前提で算定する実質価格表示の均等化コスト(貯蔵単価)とし、使用済燃料の貯蔵期間は40年として試算した。

プール貯蔵に対し、キャスク貯蔵は貯蔵容量が小さい場合でも大きい場合でも経済的に優位であることが示されたが、プール貯蔵の場合、貯蔵容量が約10,000トンの場合には、貯蔵単価はキャスク貯蔵のそれに近づくことがわかった。また、貯蔵単価をもとに、燃料の燃焼度などを用いて貯蔵費用が発電原価に占めるコストを求めた。貯蔵容量が5,000トンU、燃料冷却期間が5年の場合、貯蔵単価は各々9銭/kWh、15銭/kWh程度となった。

Keyword: 使用済燃料貯蔵, 敷地外貯蔵, 経済性評価, 金属キャスク貯蔵, プール貯蔵

Concerning the spent fuel storage away from reactor, economical comparison was carried out between metal cask and water pool storage technology. The economic index was defined by levelized cost (Unit storage cost) calculated on the assumption that the storage cost is paid at the receipt of the spent fuel at the storage facility. Storage period is assumed to be 40 years.

It is found that the cask storage is economical for small and large storage capacity. Unit storage cost of pool storage, however, is getting close to that of cask storage in case of storage capacity of 10,000ton. Then, the unit storage cost is converted to power generation cost using data of the burn up of the fuel, etc. The cost is obtained as ¥0.09/kWh and ¥0.15/kWh for cask storage and pool storage, respectively in case of the capacity of 5,000tonU and the cooling time of 5 years.

Keyword: Spent fuel storage, Off-site storage, Economic evaluation, Metal cask storage, Pool storage

1 はじめに

平成6年6月に改訂された新原子力長計では、第2民間再処理工場の計画が従来より延期され、将来的な使用済燃料貯蔵の方法等についても検討を進めることなどが示された。

使用済燃料貯蔵に関する最近の動向として、平成9年2月通産省総合エネルギー調査会原子力部会において当面の対応として「使用済燃料施設増強も含め貯蔵の長期化に対する立地地域の理解を得る努力を得ることが重要である」と述べるとともに、長期的対応として「2010年頃を目途に発電所外での貯蔵も可能となるような所要の環境整備を行うことが重要である」との見解を示した。これを受け、同年2月の閣議において「使用済燃料は有用な資源として再処理されるまでの間、適切に貯蔵保管される必要がある一方、長期的に貯蔵量が增大する見通しであることから、従来の発電所内貯蔵に加え、発電所外での貯蔵についても検討を進める」との了解がなされている。

さらに、これらの決定を受け、電気事業者からなる使用済燃料貯蔵対策検討委員会が発足し、「リサイクル燃料資源の貯蔵」の必要性、貯蔵事業のあり方、関連法規の整備等についての検討が行われ原子力部会において報告された。原子力部会では、この報告をもとにリサイクル燃料資源中間貯蔵について2回にわたり審議を行い、平成10年6月11日に出された報告書の中で、リサイクル燃料資

源中間貯蔵を実現していくために、国においては法制度の整備等を、事業者においては施設の立地に向けた取り組み等を早急に進めることが肝要であるとの見解を示した。

これらの動きを背景として、現在、原子力安全委員会原子力安全基準専門部会において使用済燃料の中間貯蔵施設指針の審議が行われている。

本論文では発電所敷地外における使用済燃料貯蔵について、貯蔵施設概念設計および貯蔵量や搬入量等で設定される貯蔵シナリオのもとで貯蔵コストを試算し、貯蔵方式間の経済性比較を行った結果について述べる。なお、本評価では、貯蔵方式間の技術的な経済性比較を主眼として実施しているため、施設の建設、運転、閉鎖に関わる直接費用のみ算定しており、以下のような財務的要素については、その一部が間接的に割引率の数値に反映されているものの、明示的な考慮は加えていない。

事業収益、報酬等

借入れ利払い、配当等

事業経営に必要な費用

また、土地の取得費についても、現状では、新規購入の有無、価格の設定等、現状では不確定要素があるため、本評価では考慮していない。

2 経済性評価の指標

経済性の指標として使用済燃料単位量あたりの貯蔵費用(以後、貯蔵単価と記す)を用いる。さらに、この貯蔵単価を、貯蔵で対象とした燃料から発生した電力量に割り戻し、貯蔵費用が発電原価に占める割合についての試算を行う。

Economical evaluation on spent fuel storage technology away from reactor by Chihiro Itoh (ito@criepi.denken.or.jp), Koji Nagano, Toshiaki Saegusa

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所 材料構造部 Structural Department, Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry(CRIEPI) 千葉県我孫子市我孫子 1646

** (財)電力中央研究所 経済社会研究所 Socio-economic Research Center Central Research Institute of Electric Power Industry(CRIEPI) 東京都千代田区大手町 1-6-1

貯蔵単価の算定は、文献[1],[2]で採用された、割引現金収支法(Discouted Cash Flow Method)による均等化単価(Levelized Unit Cost)によった。これは、

$$\text{総費用現在価値} = \text{総収入現在価値}$$

を満足するような一定の単価[¥/kgU]を算出するものであり、OECD/NEA の原燃サイクルコスト評価(文献[3],[4]参照)で採用された手法と同等のものである。

収入は、一定の単価と、実際に貯蔵に供された燃料の量[kgU]の積で表されるので、

$$t \text{ 年度における収入} = \text{貯蔵単価}[\text{¥/kgU}] * t \text{ 年度における使用済燃料搬入量}[\text{kgU}]$$

となる。これを現在価値に換算した総額

$$I_{NPV} = \sum_{t=0}^{t_E} (1+r)^{T-t} * \{\bar{C} * Q(t)\}$$

が、支出(費用)の現在価値総額

$$C_{NPV} = \sum_{t=0}^{t_E} (1+r)^{T-t} * C(t)$$

と一致するような単価 \bar{C} を算出する。

このとき、貯蔵に供する使用済燃料を貯蔵施設に搬入した時点で、貯蔵施設の建設、運転から廃止に至るまでの全期間中に発生するすべての費用を一括して、貯蔵料金として前払いすることを仮定していることに注意を要する。

すると、 \bar{C} は時刻 t に依存しないので、次式を得る。

$$I_{NPV} = C_{NPV}$$

$$\therefore \sum_{t=0}^{t_E} (1+r)^{T-t} * \{\bar{C} * Q(t)\} = \sum_{t=0}^{t_E} (1+r)^{T-t} * C(t)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum_{t=0}^{t_E} (1+r)^{T-t} * C(t)}{\sum_{t=0}^{t_E} (1+r)^{T-t} * Q(t)}$$

ここに、

- \bar{C} : 均等化単価
- I_{NPV} : 収入の現在価値総額
- C_{NPV} : 支出(費用)の現在価値総額
- $t[0, t_E]$: 貯蔵施設の建設、運転、廃止措置の全てに関するプロジェクト期間
- r : 割引率
- T : 現在価値換算の基準時点(任意に選べる)
- $Q(t)$: t 年度における貯蔵施設への使用済燃料搬入量[kgU]
- $C(t)$: t 年度における貯蔵施設の建設、運転、廃止措置等に関する支出(費用)

本論文の記載においては、全ての費用項目は 1999 年実

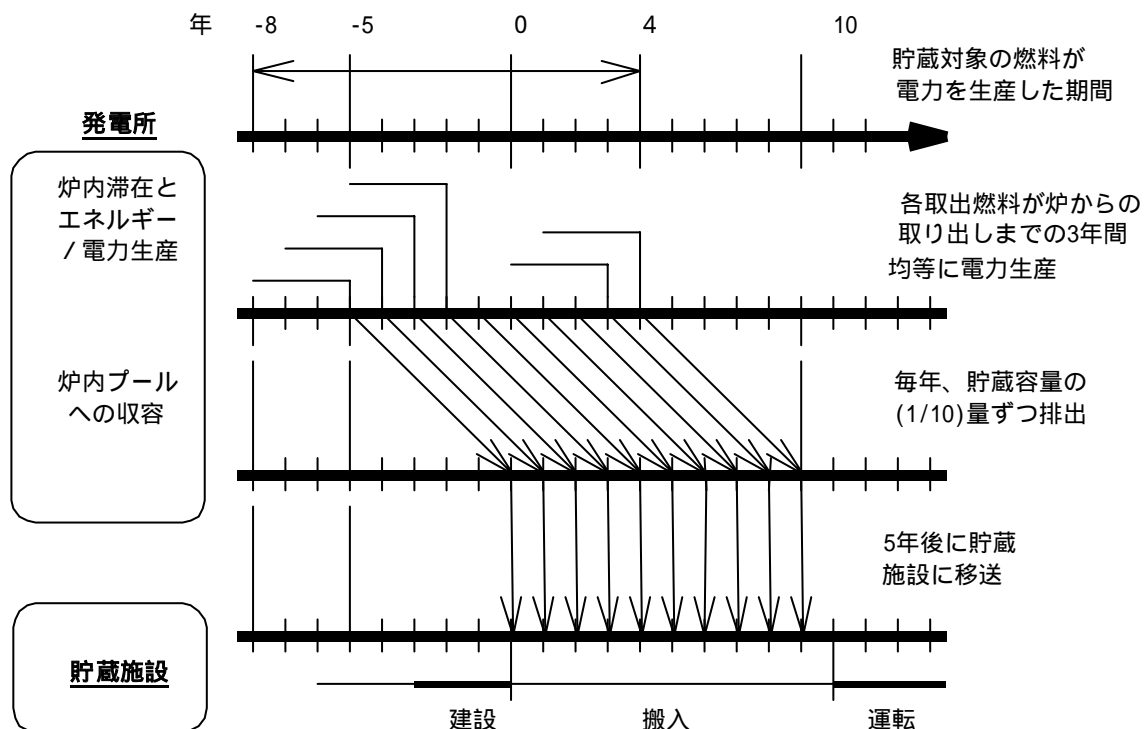


Fig.1 Assumptions on the enrgy production, cooling time, and transportation to storage facility of spent fuels

質価格表示(real term)とした。また、貯蔵費用が発電原価に占める割合(本報告では、これを[貯蔵コスト「¥/kwh」]については、以下の前提より求めた。

- ・ 発電効率は、33%とする。
- ・ 貯蔵量の 1/10 の燃料が炉内で 3 年間、均等に燃焼する。
- ・ 10 年間にわたり、複数 / 多数の原子炉から貯蔵容量の 1/10 量ずつが毎年排出され、炉内プールに収容された後に、5 年経過後に同量ずつが 10 年にわたり貯蔵施設へ搬入される (Fig.1 参照)

3 評価の前提条件

3.1 貯蔵シナリオ

(1)対象貯蔵施設

使用済燃料貯蔵施設としては、現在、水プ - ル貯蔵、金属カスク貯蔵、ボ - ルト貯蔵、サイロ貯蔵およびコンクリ - トカスク貯蔵技術が実用化されているが、本検討では、我が国で、すでに実用化されている水プ - ル貯蔵施設、金属カスク貯蔵施設を対象とし、(2)燃料条件に示す燃料を対象として、(4)貯蔵施設容量に示す貯蔵容量を持つ貯蔵施設の概念設計を行い、この設計にもとづき、資本費等の費用見積もりを行っている。

なお、金属カスク貯蔵施設では、輸送・貯蔵兼用カスクを用いている。

(2)燃料条件

貯蔵される燃料の取り出し燃焼度は BWR,PWR 型燃料ともに一律 40Gwd/t とし、原子炉付属プールでの冷却期間は 5 年とした。BWR 燃料と PWR 燃料の貯蔵量は発電容量の比率とし 55:45 とした。

(3)評価の範囲

本評価での対象は以下のとおりとした。

- 貯蔵施設の建設
- 発電所から貯蔵施設までの輸送
- 貯蔵
- 貯蔵施設から再処理施設までの輸送
- 貯蔵施設の解体・撤去

(4)貯蔵施設容量

貯蔵施設の容量は
3000MTU / 5000MTU / 10000MTU

とし、本評価では各容量を持つ施設 1 基を建設するものとした。すなわち、使用済燃料の搬入量に応じて、段階的に施設建設をすることは考慮していない。

(5)燃料貯蔵期間

使用済燃料の貯蔵期間は 40 年とした。すなわち、貯蔵施設は操業開始後 10 年間にわたり使用済燃料の搬入が行われ、その後 30 年間は貯蔵のみ、その後 10 年間は搬出が

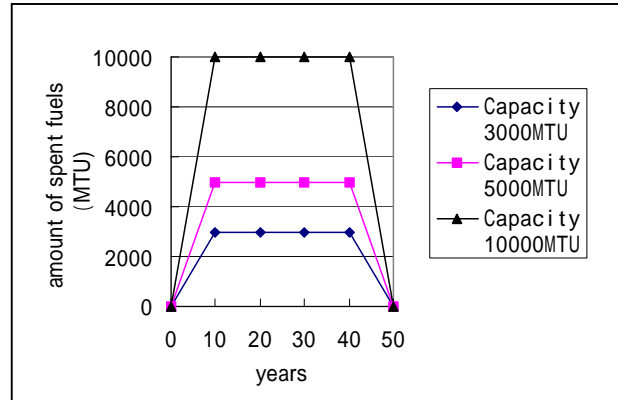


Fig.2 Assumption on amount of spent fuels

行われる。したがって、貯蔵施設としては 50 年間使用することとなる。Figure2 に本評価での使用済燃料累積量モデルを示す。

(6)費用見積もり項目[1]

資本費、運転維持費および輸送費に分け、費用を算出した。資本費は建屋、設備などの建設費、カスク費、およびデコミッションング費より構成される。デコミッションング費については、建屋費、設備費の一律 10%とした。運転維持費は維持補修費、人件費、ユーティリティ、一般管理費から構成される。輸送費については、原子力発電所から貯蔵施設、貯蔵施設から再処理施設までの輸送費を考慮し、発電所および再処理施設での荷役費、海上輸送費より構成される。貯蔵費用の見積もり項目・内容を Table1 に示す。

Table1 Items for cost estimation

Items for cost estimation		Contents
(a) Capital cost	Building	Building construction
	Equipment	SUS rack , Crane, etc.
	Cask	Including transport cask
	Decommissioning	(Building + Equipment) x10%
(b) Running cost	Maintenance	(Building + Equipment) x1% + Cas x0.1%
	Utilities	Electricity, Water, etc.
	Personnel	Monitoring / Inspection
	Administration	(Utilities + Personnel) x10%
(c) Trans- potation	Transportation from nuclear power plant to storage house	Personnel Sea transportation fee
	Transportation from storage house to reprocessing plant	Personnel Sea transportation fee

Table2 Components of the storage facilities

Method	構成
Pool	Cask depository building Water pool rack Heat-exchanger Rad waste treatmet&storage facility Utilities Radiattin monitoring equipment Control room
Metal cask	Srorage building Inspection room Hot cell Rad waste storage facility Utilities Control room Temperature&leak-rate monitoring device

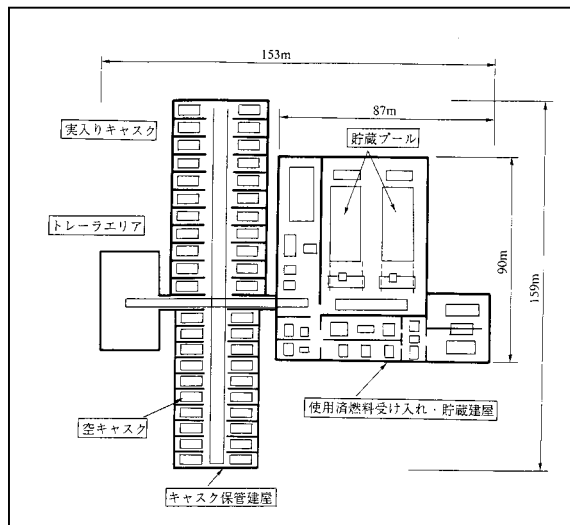
(7)キャッシュフロー

上記で求めた費用の発生時期，期間の考え方を Table2 に示す．貯蔵施設の建設には，いずれの貯蔵規模においても2年，デコミッションにも同様に2年を要するものと設定した．したがって，貯蔵施設の建設，使用済燃料の貯蔵，施設の解体までを考慮した，全事業期間は54年間となる．また，金属キャスク貯蔵で用いるキャスクは，必要となる前年度に必要な基数製作するものとした．

3.2 貯蔵施設の概要

Table2 および 3 に，先に示した燃料条件，貯蔵容量に基づき概念設計を行った貯蔵施設の主な構成と仕様をそれぞれ示す．また，施設の概略を，一例として貯蔵容量 5,000 トン U の場合について Fig.2 に示す．

Pool storage facilities



Cask storage facilities

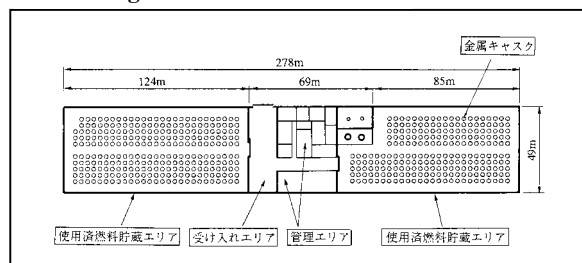


Fig.3 Outline of the storage facilities (Capacity :5000 トン U)

Table3 Specifications of the storage facilities

Storage method	Pool	Metal Cask	
Number of fuel assenblies	BWR:	B W R : 57 / cask	
		9747 / 3000MTU	171cask / 3000MTU
		16188 / 5000MTU	284cask / 5000MTU
	PWR:	32376 / 10000MTU	568cask / 10000MTU
		3072 / 3000MTU	P W R : 24 / cask
		5136 / 5000MTU	128cask / 3000MTU
	24339 / 10000MTU	214cask / 5000MTU	
		427cask / 10000MTU	
Heat removal	Forced cooling by the water in the pool	Natural convection by the air around Cask	
Shielding	waret・Building (concrete)	Cask body・Building(concrete)	
Containment	water・Building	Double lids with metal gaskets	
Atmosphere	Water	He gas	

4 経済性評価

4.1 貯蔵単価

4.1.1 貯蔵規模との関係

Table4 に各費用見積もり項目について算出した総費用を示すとともに、2章で示した手法で求めた貯蔵単価と貯蔵容量の関係を示す Fig.4 に示す。貯蔵容量が小さい場合、プール貯蔵の貯蔵単価が高いが、容量が増加するにつれて、キャスク貯蔵の貯蔵単価に近づく。これは、プール貯蔵では、貯蔵容量の増大に伴う費用の増加が少ないこと（規模の経済性）が要因になっている。本評価ではキャスク貯蔵の場合に量産効果によるキャスク制作費の若干の低減（金属キャスク費用の相対価格；3000t:5000t:10000t=1:1:0.96）を見込んでいるが、本質的には、貯蔵規模の増加に対して貯蔵ユニットを追加していく費用構造のため規模の経済性はなく貯蔵単価が貯蔵容量によらずほぼ一定値となる。

Table4 Storage cost (¥100 million)

cost \ method	Pool	Metal cask
1 . Capital cost	1,561	1,310
Construction (Building , Equipment)	1,328	105
Cask	100	1,195
Decommissioning	133	10
2 . Running cost	1,395	238
3 . Transportation	41	60
Total*	2,997	1,608

* a simple total of cost to be incurred during 54 years of operation from construction of storage facilities and storage to decommission and disposal of storage facilities

貯蔵施設の規模の経済性(Scale Economy)を見るため、貯蔵容量が3,000tUと10,000tUの場合について次式で表されるスケール指数を求めた。

$$C(p_1)/C(p_0) = (p_1/p_0)^{\alpha}$$

$$UC(p_1)/UC(p_0) = (p_1/p_0)^{\alpha-1}$$

ここに、

- C(p) 設備容量 p の施設の貯蔵費用
- UC(p)=C(p)/p 設備容量 p の施設の貯蔵単価
- p₁ 設備容量
- p₀ 基準となる設備容量
- [0 ≤ α ≤ 1] スケール指数

すなわち、スケール指数 α は次式で求まる。

$$\alpha = 1 + \ln(UC(p_1)/UC(p_0)) / \ln(p_1/p_0)$$

$$= 1 + \ln(\text{貯蔵単価}_{10,000t} / \text{貯蔵単価}_{3,000t}) / \ln(\text{貯蔵容量}_{10,000t} / \text{貯蔵容量}_{3,000t})$$

したがって、金属キャスク貯蔵の場合、

$$= 1 + \ln(29.4/32.6) / \ln(10000/3000) = 0.92$$

水プール貯蔵の場合、

$$= 1 + \ln(38.8/73.9) / \ln(10000/3000) = 0.46$$

と得られる。

キャスク貯蔵の場合は、貯蔵費用は貯蔵容量にほぼ比例するが、これに対し、プール貯蔵では、通常の「2/3 乗則」が示唆するスケール指数 0.67 を上回る規模の経済性の存在が示唆された。これは、受け入れ施設など設備容量に依存しない設備費用が含まれており大容量ほど単価で見れ

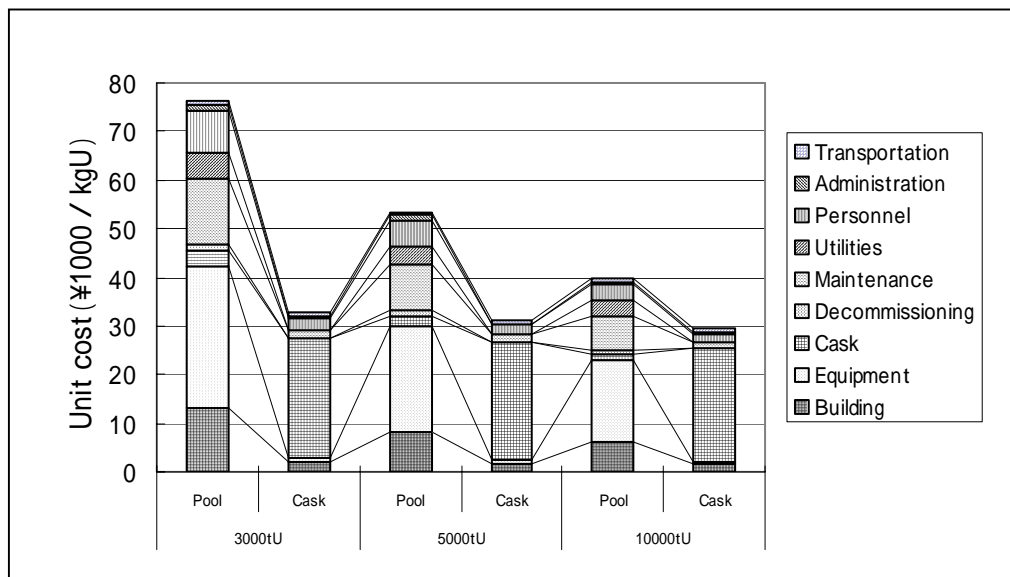


Fig.4 Unit cost of spent fuel storage

ば、この部分の低減度合いが大きいことによると考えられる。

今回の評価の範囲（貯蔵容量 3,000t~10,000tU）では、プール貯蔵の規模の経済性がキャスク貯蔵の経済性メリットを上回って発揮されることは無かったが、貯蔵容量 10,000tU の場合、両者の差は小さく、より大きな施設容量の領域で、あるいはまた更なる技術進歩があれば、プール貯蔵の経済性が金属キャスク貯蔵を上回る可能性も否定できない。

4.1.2 貯蔵期間との関係

貯蔵容量が 5,000tU の場合について、貯蔵期間を 20 年,60 年,80 年とした場合の総費用を求めた。ただし、ここでは、貯蔵施設が 80 年程度は当初の機能が維持されるものと仮定し、老朽化等による施設の建て替えや、長期使用に伴う維持補修費の増加については考慮していない。長期貯蔵時の補修費や修繕費などの情報がないため、現時点の評価としてはこのように仮定せざるを得ない。ここでの評価はあくまでも試算である。評価結果を Fig.5 に示す。

プール貯蔵では貯蔵期間が長くなるほど維持補修費が加算されるため、常に増加傾向（貯蔵期間 1 年延長ごとに約 2.8 百万円増加）にある。一方、キャスクでは増加の傾向は見られるものの、ほとんど変化はない。これはキャスク貯蔵では、いったん貯蔵モードにはいると、以降、基本的にメンテナンスフリー状態となるように仮定していることに起因する。貯蔵単価については、貯蔵期間が長い場合でも、費用の発生が使用済燃料貯蔵の時点から離れるため、費用の現在価値で見ればその寄与が小さくなり、プール貯蔵の場合にも、貯蔵期間によらずほぼ一定となる。

4.1.3 割引率

本評価では割引率を 5% として計算したが、公益性の高い使用済燃料貯蔵事業の場合には 5% は高いとの批判もあ

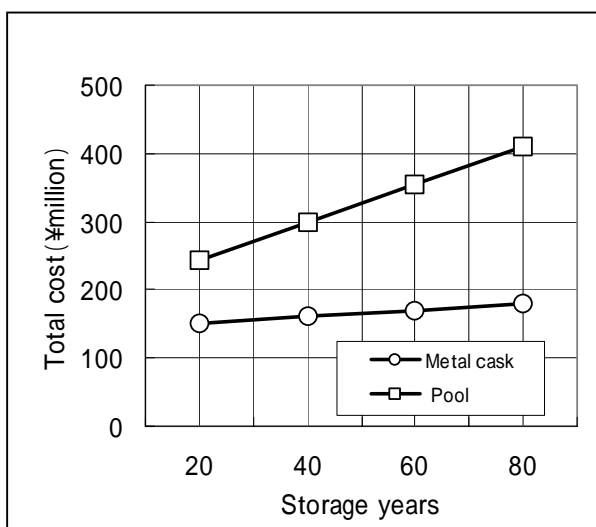


Fig.5 Total storage cost against storage years (Capacity:5,000tU)

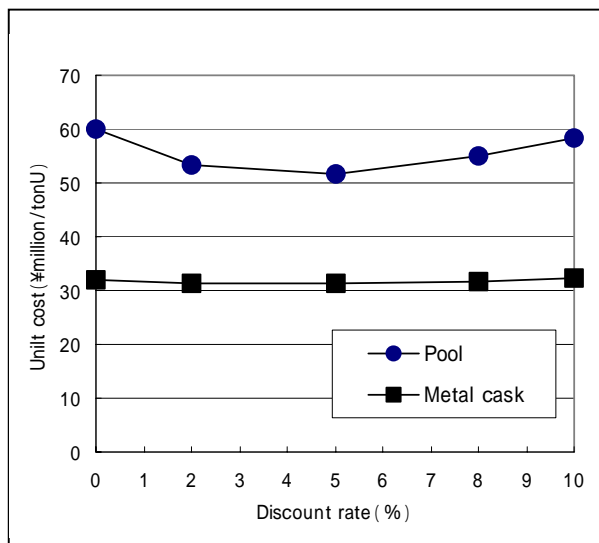


Fig.6 Unit cost against discount rate (Capacity:5,000tU)

りえるので、割引率を 0%, 2% とした場合、また事業主体として民間による倉庫業等の事業形態も想定し、8%, 10% とした場合についてについての評価により、割引率が貯蔵単価に及ぼす影響について検討した。Fig.6 に結果を示す。割引率の変化による貯蔵単価の変動は比較的小さい。これは、本評価の設定条件の下では費用の発生時期と貯蔵による収入発生の時期が比較的重なり合っていることに事に起因する。

4.1.4 その他

キャスク貯蔵では Fig.4 に示されたように、貯蔵単価の中で金属キャスク費がおおよそ 80% 程度を占めている。ここでは金属キャスク費を 1/2 とした場合について貯蔵単価を試算してみた。Fig.7 に貯蔵単価の比較を示す。同図において縦軸は基本ケースの貯蔵単価で各ケースの単価を除いた値を示している。図に示されるように、キャスク費が 1/2 になることによって、貯蔵単価は 6 割程度に減

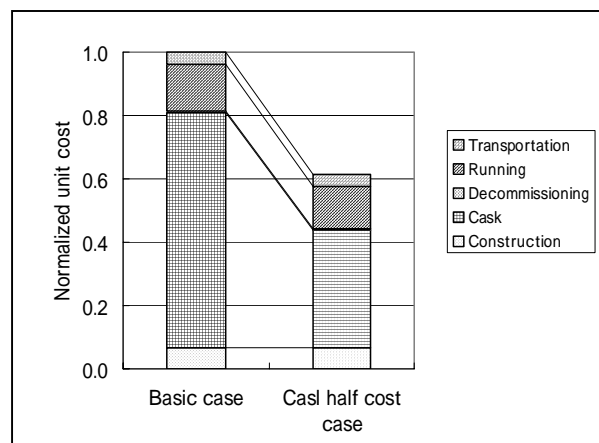


Fig.7 Case study (Capacity:5,000tU)

Table5 Storage cost [¥/kWh]

Storage capacity	3,000MTU		5,000MTU		10,000MTU		
	Coolong time	5years	15years	5years	15years	5years	15years
Metal cask		0.095	0.058	0.091	0.056	0.085	0.052
pool		0.214	0.132	0.150	0.092	0.112	0.069

少しており、キャスク貯蔵の経済性を向上するためにはキャスク費を低減することが極めて効果的であることが確認された。

4.2 発電原価への影響

4.2.1 貯蔵コスト

2章で述べた前提にもとづき、貯蔵コスト[¥/kWh]を試算した。Table5に結果を示す。同表には炉内プール滞在期間を5年から15年に延長したケースも合わせて示した。貯蔵コストは冷却年数5年の場合、金属キャスク貯蔵でkwhあたり9銭程度、プール貯蔵で15銭程度となる。

4.2.2 冷却期間の問題

今回の検討では、使用済燃料の発生・搬入は使用済燃料貯蔵施設側での仮定条件で設定しており、実際の発電所での運転・取り出し並びに搬出スケジュール等に即したものはなっていない。たとえば、わが国の原子力発電所の炉内貯蔵プールの貯蔵容量は、とくに小さなものの場合で平衡取り出し燃料にして5年分程度であるが、通常の発電所ではそれ以上の貯蔵容量を持っており、炉内プール中の滞在時間は一般に5年より長いといえる。

冷却期間を5年とした基準設定の場合、当該の使用済燃料が実際に電力生産を行っている時期は、貯蔵施設の運用時点やその後の燃料の搬入期間と重なっているため、貯蔵単価を電力量あたりの費用に換算する際に、双方が時間的にずれていることによる割引計算上の見かけの増減はほとんど発生しない。冷却期間をより長く取るよう仮定する場合には、それに伴う施設設計の変更（コスト低減要因）がないものとみなしても、発電による売電収入が貯蔵料金の支払いに先立って発生することになり、その時間差に関する割引計算による見かけ上の効果（電力量あたりの貯蔵単価の低減）が発生する。冷却期間を15年としたケースでは、5年のケースの結果に対して1.05⁻¹⁰倍した計算になっている。

なお、この取り扱いには、暗黙裡の仮定として、売電時に貯蔵料金相当分を拠出し、それを冷却期間中を通じて割引率に等しい金利で運用するとしたことを意味している。実際に、貯蔵料金がどのように拠出され、運用されるかによっては、上記の取り扱いがあてはまらない場合があり得る。

5 おわりに

使用済燃料の敷地外貯蔵技術（プール貯蔵方式、キャスク貯蔵方式）の経済性について比較評価を行った。貯蔵単価による比較では、貯蔵容量の大小にかかわらずキャスク貯蔵が経済性に優れていることが示されたが、貯蔵容量が10,000tUの規模になると、プール貯蔵方式もキャスク貯蔵方式とほぼ同等にまで低減することがわかった。

また、貯蔵費用の発電原価に占めるコスト（貯蔵コスト）[¥/kWh]を試算した。その結果、貯蔵コストは貯蔵容量5,000tU、冷却年数5年の場合、キャスク貯蔵で9銭、プール貯蔵で15銭との結果を得た。

今後は、より現実的な使用済燃料発生、炉内プール収容、貯蔵施設建設と搬入のスケジュール策定など、わが国の原子力発電システム全体の運用の観点から詳細な評価を加えた上で貯蔵にかかわる経済性を論じる必要があると考える。

参考文献

- [1] 山地憲治，長野浩司，三枝利有：使用済燃料乾式貯蔵技術の検討・評価 各種貯蔵技術の経済性比較。財団法人電力中央研究所報告，昭和62年8月。
- [2] IAEA: Cost analysis methodology of spent fuel storage. Technical Reports Series No. 361, Appendix III and Appendix V (1994).
- [3] OECD/NEA: The Economics of Nuclear Fuel Cycle. OECD, Paris (1985).
- [4] OECD/NEA: The Economics of Nuclear Fuel Cycle. OECD, Paris (1994).

