

Doc No. 18-180-I-125 Rev. 2

2021年2月3日

トランスニュークリア株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（TK-26型）

遮蔽・臨界解析コードの妥当性

本資料のうち、枠囲いの内容は、商業機密等に属しますので公開できません。

番号	項目	質問日	コメント内容
—	遮蔽 臨界	2020/12/7 ヒア⑭	<p>○臨界解析 KENO-VI と KENO V. a との差異について説明すること。</p> <p>○遮蔽解析 MCNP コードを使用することの妥当性について整理すること。</p>

1. はじめに

本図書では、臨界解析で使用されている KENO-VI と KENO V. a との差異、及び遮蔽解析で MCNP コードを使用することの妥当性について整理して説明する。

2. KENO-VI と KENO V. a との差異について

臨界解析ではモンテカルロ計算コード KENO-VI を使用している。KENO-VI は輸送キャスクの安全解析ではすでに複数の認可実績がある。KENO-VI は、中間貯蔵キャスクの臨界解析で使われている KENO V. a とは本質的な違いはない。これらの計算コードの違いについて以下に説明する。

2.1 KENO-VI と KENO V. a の主な違い

臨界解析に使用されている KENO シリーズは ORNL (オークリッジ国立研究所) で開発されたコードであり、現在は安全解析コードシステムである SCALE^{注1} の中に組み込まれている。

この SCALE コードシステムの中で KENO V. a は 1985 年にリリースされ広く使用されてきた。これに対し、KENO-VI は 1995 年に KENO V. a の形状入力制限を解除するために開発されたものであり、SCALE の中では両方のコードが使用できるようになっている。

このように、KENO-VI と KENO V. a の違いは形状入力方法の違いが主たるものである。つまり、KENO-VI は形状入力がより汎用的にできるように工夫されたものであるが、このために計算時間が長くなるようになったため、KENO-VI の形状機能を使う必要がなければ KENO V. a を使用することが推奨されてきた。しかし、最近の計算機の性能向上により、この計算時間の差が少なくなり、かつ、KENO-VI を用いることにより、臨界解析上最も重要なバスケットやキャビティ内部の構造をより正確に表現できることから、本解析では、KENO-VI を使用している。

なお、KENO-VI と KENO V. a の違いは上述のように形状入力方法の違いが主たるものであり、この二つのコード間で対象とする計算モデル体系が同一であれば有意な差が発生しないことは多くのベンチマーク計算の比較等で確認されている。例えば、ORNL/TM-2018/884: Criticality safety validation of SCALE6.2.2 の Table 23^{注2} には 559 ケースのベンチマーク問題に対する KENO-VI と KENO V. a の計算結果が比較されており、同等の結果が得られると結論付けられている。

注1 添付資料-1 参照

注2 添付資料-2 参照

2.2 KENO-VI と KENO V. a の形状入力方法の比較

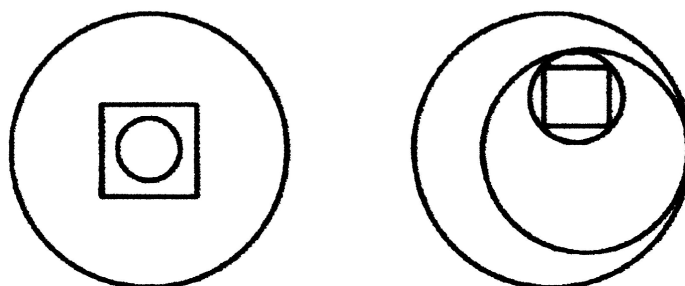
2.2.1 形状入力方法の原則

形状入力により領域定義する際の包含条件（外側の形状は、内側の形状をすべて含む必要がある）の有無がこの二つのコード間の大きな差異である。

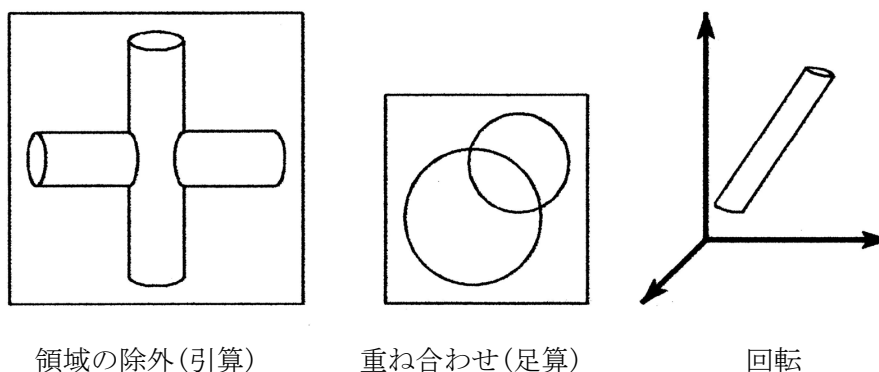
コードマニュアルによると KENO V. a では一つの『unit(形状を組み合わせた一つの単位領域)』の定義をする際には内側にある形状から順番に定義していくが、その際には図 4(a)に示すように、その外側に来る形状は内側にある形状を完全に内側に含んでいなければならない。このような条件を課することにより計算時間の短縮化を図っている。

一方、KENO-VI ではこのような制限は一切なく、図 4(b)に示すように任意の組み合わせが可能であり、かつ各形状を回転させて定義することも自由である。さらに使用できる形状データも豊富である。

ORNL-DWG 83-14791



(a) KENO V. a のモデル図形の制限

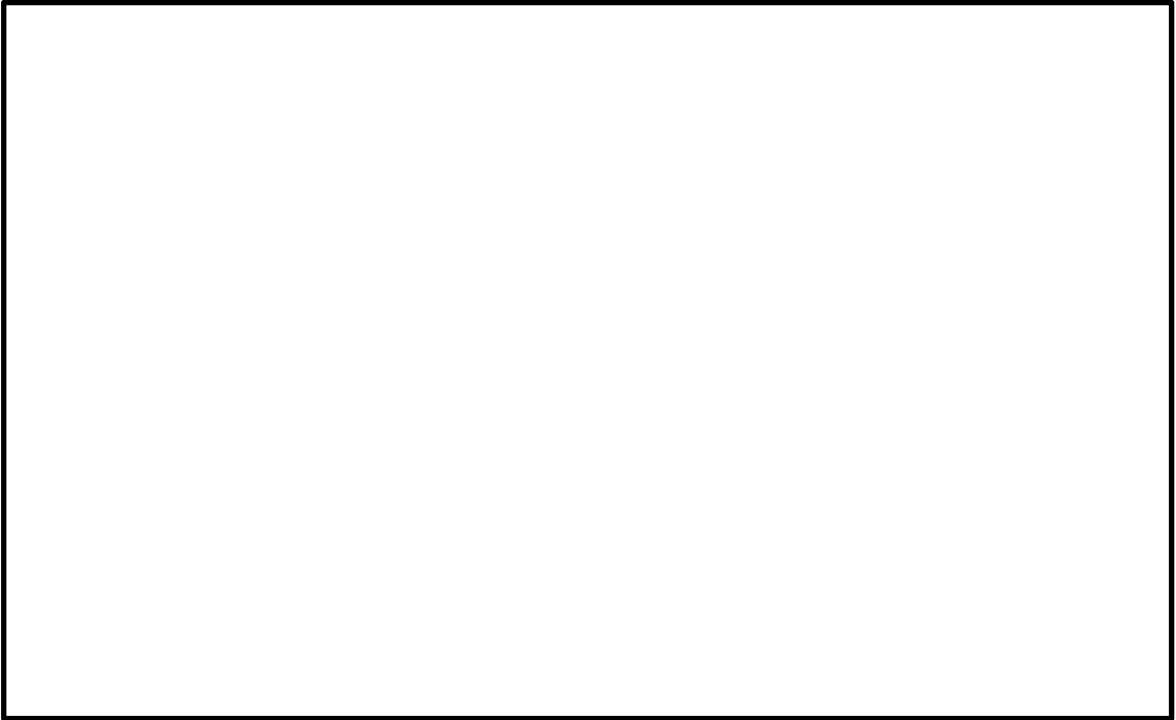


(b) KENO-VI で許容される図形の例

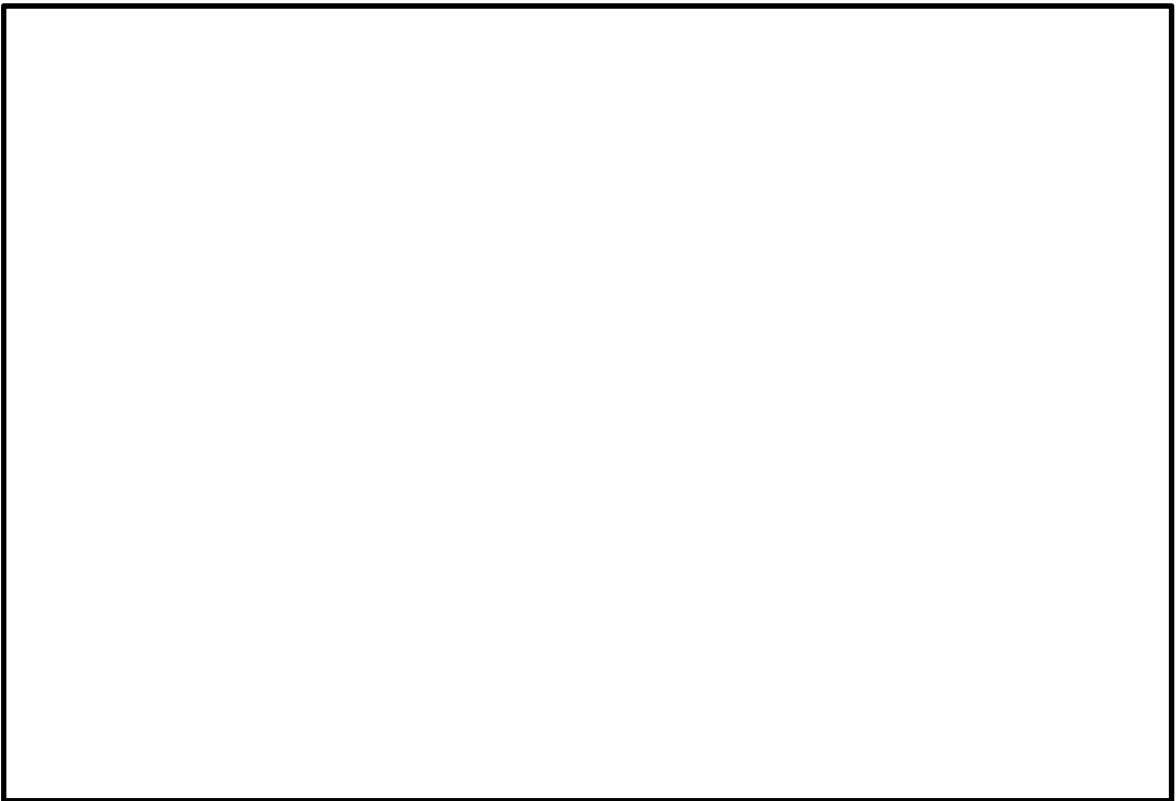
図 4 KENO V. a と KENO-VI の形状モデル作成の考え方の違い

2.2.2 TK-26 のモデル化の例

KENO-VI による TK-26 の臨界解析モデルを図 5(a)に示すが、これを KENO V. a でモデル化する場合には図 5(b)に示すようにキャビティ内径を大きくし、本体胴を少し薄くした形状に近似する必要がある。また、バスケット外周にあるアルミニウム合金の部材のモデル化でも板状の形状を組み合わせることにより近似すると言ったような工夫が必要である。このため、本解析では KENO-VI を使用している。



(a) KENO-VI による今回の臨界解析モデル



(b) KENO V. a を用いた場合に想定される臨界解析モデル(イメージ)

図 5 臨界解析モデルの比較例

3. MCNP コードを使用することの妥当性について

遮蔽解析では三次元連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP5 を使用しているが、このコード使用の妥当性について以下に説明する。

3.1 MCNP5 コードの概要

遮蔽解析に使用される MCNP シリーズは米国ロスアラモス国立研究所で開発された中性子、光子及び電子の輸送問題を解くための汎用モンテカルロコードである。MCNP5 は、2002 年に初版がリリースされ、今回使用したバージョンは MCNP5 1.60 (2010 年リリース) である。

このコードは二次曲面の論理演算によって表現された任意の三次元領域を取扱うこともでき、断面積データを多群近似化せず連続エネルギー断面積を採用している。これらにより、幾何形状の設定の自由度が大きく、また、断面積データを正確に取り扱うことができる等の利点がある。

断面積データに関しては、ガンマ線評価では EPDL97 をもとに作成された断面積ライブラリ MCPLIB84、中性子評価では ENDF/B-VII.0 をもとに作成された断面積ライブラリ ENDF70 を用いている（ロスアラモス国立研究所にて整備されたもの）。

3.2 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

3.2.1 検証 (Verification)

本解析コードの検証内容を以下に示す。

- ① 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件^{注3}を満足していることを確認している。
- ② MCNP はガンマ線及び中性子の放射線束分布計算を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源、遮蔽体構造である。これらの解析条件が与えられればガンマ線及び中性子の放射線束分布解析計算は可能であり、線量当量率変換係数を乗じることで MCNP はガンマ線及び中性子線量当量率計算に適用可能である。

3.2.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

- ① キャスクまわりの線量率比較用として NEACRP のキャスクベンチマーク問題として採用された TN-12/1 型使用済燃料キャスクの中性子線量率分布¹⁾、国内の NFT-38B 型使用済燃料キャスクの中性子及びガンマ線量当量率分布¹⁾、さらに TN12/2 型使用済燃料キャスクの中性子及びガンマ線量当量率分布²⁾について MCNP によ

注3 添付資料-3 参照

る計算値と比較している。測定値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。

- ② 今回のTK-26キャスクの中性子及びガンマ線量当量率計算では、上記妥当性確認における測定体系と同様に、キャスク本体の深層透過あるいはオフィス等からのストリーミングによる放射線束分布を計算し、線量当量率を求めているが、今回のガンマ線及び中性子線量当量率計算の内容は、上記妥当性確認内容と合致している。
- ③ また、「原子力発電所放射線遮蔽設計規程」(JEAC4615-2020)では、原子力発電所附属施設遮蔽のための輸送計算コードとして、モンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされており、さらに米国では使用済燃料乾式貯蔵キャスクを含むシステムの審査指針である「Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage system at a General License Facility」(NUREG-1536)において遮蔽計算ツールとしてMCNPコードが記載されており、遮蔽設計、線量当量率評価等で使用されている。
- ④ 断面積ライブラリMCPLIB84及びENDF70については、上記のキャスクのうちTN-12/1型及びNFT-38B型キャスクの測定結果との比較計算に使用されており、結果が概ね一致していることを確認している。
- ⑤ 上記妥当性確認では、放射線のエネルギーは使用済燃料のエネルギースペクトルとなっており、今回の使用目的と合致している。

(参考文献)

- 1) 日本原子力学会 「モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化 平成23年度報告書」(2012)
(TN-12/1型キャスク) 付録6 表2-13及び表2-14 (P.172、P.173)
(NFT-38B型キャスク) 付録6 表4-6から表4-8 (P.237、P.238)
- 2) H. Taniuchi, and F Matsuda, "Dose rate measurements and calculation of TN-12/2 packages", Nuclear Technology, Vol.127, pp.88-101 (1999).
(TN-12/2型キャスク) Table VII 及び Table VIII (P.95、P.97)

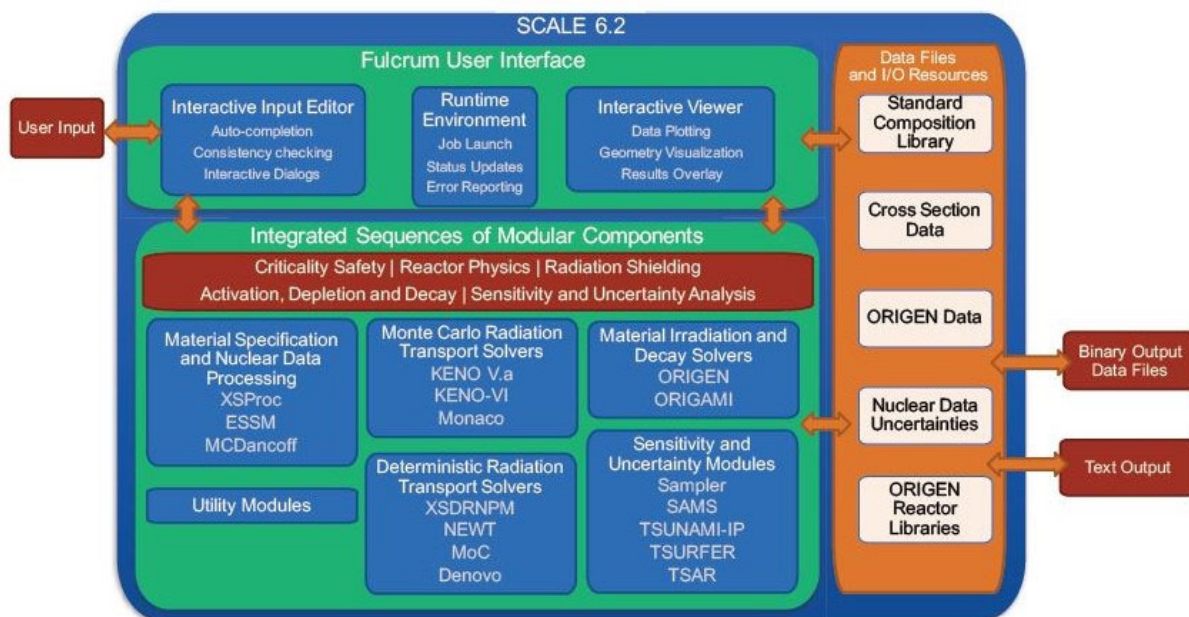
添付資料-1 SCALE コードシステムの概要及び臨界解析の流れ

SCALE コードシステムは遮蔽・臨界関連の各種評価機能を統合した解析システムである。

SCALE コードシステムの構成を図添 1-1 に示す。実効増倍率の計算を行う KENO シリーズは、遮蔽解析コードである Monaco と同じく主要な計算コードである。

SCALE コードシステムの内、TK-26 型の臨界解析で用いた計算フローを図添 1-2 に示す。

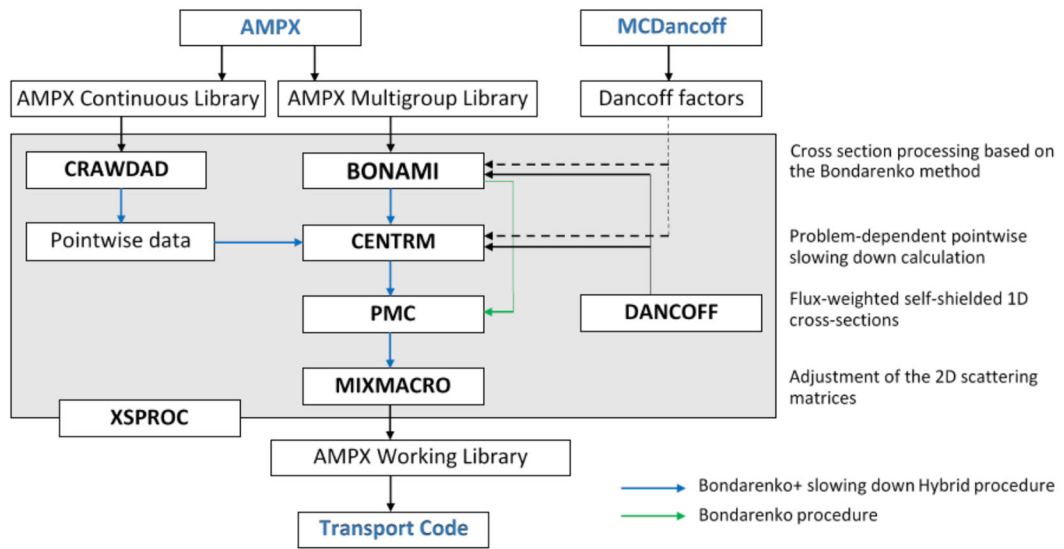
材料の断面積処理に使用される XSProc モジュールはバージョン 6 から取り入れられた処理システムである。XSProc モジュールの断面積処理フローを図添 1-3 に示す。また、XSProc 導入前の断面積処理のフローを図添 1-4 に示す。従来個別のコードが順次行っていた処理を、XSProc はそのモジュール内で連続的に行うように変更されたものであり、計算時間の短縮が図られている。なお、断面積処理に使用する BONAMI、CENTRM、PMC コードには変更はない。



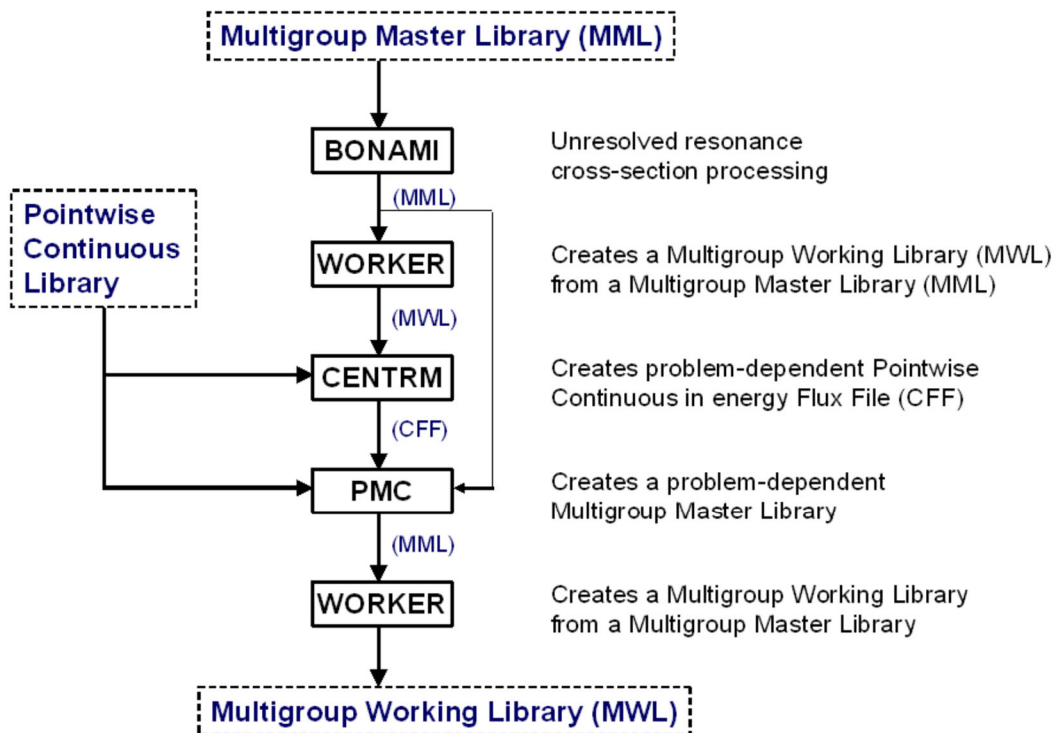
図添 1-1 SCALE コードシステム(バージョン 6.2)に含まれるプログラムの全体像
(SCALE ホームページより)



図添 1-2 TK-26 型の臨界解析で用いた SCALE コードシステム内の計算フロー



図添 1-3 XSPROC モジュールによる断面積データ処理の流れ



図添 1-4 XSPROC 導入前の断面積データ処理の流れ

4.3 COMPARISON OF KENO V.A AND KENO-VI

The range of systems comparing all six libraries (238-group and CE from ENDF/B-VII.0 and 56-group, 252-group, 200-group, and CE from ENDF/B-VII.1) using KENO-VI is not as extensive as the range using KENO V.a. The geometry description required for KENO-VI is more complicated than the description for KENO V.a due to its added flexibility, so KENO-VI is typically only used in cases requiring generalized geometry or hexagonal array capabilities. KENO-VI cases also tend to take longer to run, although the relative runtime compared to KENO V.a has improved with recent SCALE releases.

In this report, all cases considered for the KENO V.a validation are converted to KENO-VI inputs using the c5toc6 utility, run with the CE library from ENDF/B-VII.1, and compared with KENO V.a ENDF/B-VII.1 CE library results. The Monte Carlo uncertainty for most cases was $0.00010 \Delta k$. A few cases converged to $0.00049 \Delta k$, and some cases had final uncertainty values between the two. Table 23 provides the average k_{eff} values and associated uncertainties for each category of experiments. The average of all individual case differences is $4.46 \times 10^{-6} \Delta k$, with a standard deviation of $7.48 \times 10^{-6} \Delta k$. The mean for the distribution is 0.00002. The number of cases compared in each category, along with the number that agree within 1 and 2 sigma (σ is defined as the root-sum-square of the respective Monte Carlo uncertainties for the respective case) are shown in Table 24. Out of the total 559 cases, 30 or 5.37% of the differences are more than 2 sigma. In a normal distribution 4.55%, or about 25 cases, would be

expected to disagree by more than 2 standard deviations. Figure 68 is a histogram of all individual case differences, with an imposed normal distribution of 5,000 random numbers with the same mean and standard deviation shown as a solid line.

Table 23. Average k_{eff} values and uncertainties for KENO V.a and KENO-VI

Category	KENO V.a		KENO-VI		Difference	
	Average k_{eff}	Uncertainty	Average k_{eff}	Uncertainty	Average Δ	Uncertainty
HMF	1.00162	0.00002	1.00158	0.00002	-0.00004	0.00003
HST	0.99794	0.00002	0.99794	0.00002	0.00001	0.00002
IMF	1.00317	0.00003	1.00321	0.00003	0.00004	0.00004
LCT	0.99944	0.00001	0.99942	0.00001	-0.00003	0.00002
LST	0.99832	0.00007	0.99851	0.00007	0.00018	0.00009
MCF	0.99255	0.00007	0.99256	0.00007	0.00001	0.00010
MCT	0.99998	0.00002	1.00001	0.00002	0.00003	0.00003
MST	0.99813	0.00003	0.99821	0.00003	0.00007	0.00004
PMF	1.00012	0.00003	1.00009	0.00003	-0.00003	0.00004
PST	1.00296	0.00001	1.00297	0.00001	0.00001	0.00002
UCT	1.00168	0.00006	1.00181	0.00006	0.00013	0.00008
UMF	0.99846	0.00003	0.99848	0.00003	0.00002	0.00004
USI	0.98271	0.00002	0.98275	0.00002	0.00004	0.00003
USM	0.97901	0.00004	0.97895	0.00004	-0.00006	0.00005
UST	1.00057	0.00001	1.00057	0.00001	-0.00003	0.00001

添付資料-3 MCNP コードの運用環境

開発機関から提示された要件		TNT 社の運用環境
ハードウェア	メモリ：500MB 以上 ハードディスク：14GB 以上	
ソフトウェア	Linux (32-bit and 64-bit)	