

高速炉蒸気発生器伝熱管の破損伝播解析

(破損伝播解析コードLEAP IIによる実験検証)

1982年4月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速炉蒸気発生器伝熱管の破損伝播解析

(破損伝播解析コードLEAP IIによる実験検証)

田 辺 裕 美* 三 宅 収*

大 後 美 道** 佐 藤 稔*

要 旨

ナトリウム冷却高速増殖炉の蒸気発生器でのナトリウム-水反応による伝熱管の破損伝播現象を解析するためにLEAP IIコードが開発された。本報告書は蒸気発生器安全性総合試験装置(SWAT-3)を用いて実施された破損伝播試験Run-14及びRun-15の結果として得られた破損伝播の進行と、LEAP IIコードの計算結果との比較により、同コードの検証計算を行なったものである。主な結果は以下の通り。

- i) 感度解析の結果、タイム・メッシュ、ジェット分割数などの計算コード上のパラメータが計算結果(水リーク率の時間変化)に及ぼす影響を把握する事ができた。
- ii) SWAT-3 試験との比較から、本コードは常に、破損伝播の規模を実現象と比べて保守的に評価できる事が明らかとなった。

* 高速炉安全工学部 プラント安全工学室

** 高速増殖炉開発本部

Apr., 1982

Failure Propagation Analysis of LMFBR Steam Generator Tube

(Analysis of SWAT-3 Runs 14 and 15 by LEAP II Code)

Hiromi TANABE*, Osamu MIYAKE*,
Yoshimichi DAIGO**, and Minoru SATO*

ABSTRACT

The Computer code LEAP II had been developed in order to analyze failure propagation phenomena by the sodium-water reaction in the steam generator of LMFBR. Here reported is verification analysis of the LEAP code by using Runs 14 and 15 test results of Steam Generator Safety Test Facility (SWAT-3). The main results are as follows:

- 1) As the results of parametric survey, the effects of the significant parameters such as time mesh, jet division number, etc. to the code were understood.
- 2) In comparison with the test results of Runs 14 and 15 of SWAT-3, the LEAP code can estimate the phenomena conservatively enough.

* Plant Safety Section

FBR Safety Engineering Division, Oarai Engineering Center, PNC

** FBR Development project, PNC

目 次

1.	はじめに	1
2.	SWAT-3 Run-14, 15 試験の概要	2
2.1	試験装置	2
2.2	試験条件	2
2.3	試験結果	2
3.	計算条件	8
3.1	体系	8
3.2	給水側条件	8
3.3	その他のパラメータ	8
4.	計算結果の検討	14
4.1	パラメータ・サーベイ	14
4.2	Run-14 試験結果との比較	15
4.3	Run-15 試験結果との比較	16
5.	まとめ	30
6.	参考文献	31
	APPENDIX	33

1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」蒸気発生器の設計に当たっては、設計基準水リーク（Design Basis Leak：DBL）を設定し、このDBL規模の事故に対して、安全系が正常に作動し機器の健全性が保たれるように設計されなければならない。²⁾

DBL値の選定は、現象としてのナトリウム-水反応を正確に把握した上で、想定され得る最大規模を上回り、なお且つ過度な余裕を排して行なわれなければならない。

適切なDBL値を選定するために、動燃事業団においては、微小リークから大リーク規模までの初期リークに対する破損伝播試験を実施して、全水リーク規模における破損伝播現象に関するデータを集積した。そして、これらに諸外国の実験データを加味して破損伝播解析コードLEAPを開発した。¹⁾この計算コードは、初期リークの発生に始まり、破損伝播を繰返しながらリーク規模を拡大し、遂にリーク検出されて水系のブローを経てナトリウム-水反応が終止するまでの過程を模擬するためのものである。

更に動燃内の蒸気発生器安全性総合試験装置（SWAT-3）を用いて、最初のリーク発生からブロー後の反応の終止までを模擬した長時間模擬の破損伝播試験が2回（SWAT-3 Run-14及びRun-15）実施された。³⁾これは、実機条件に極めて近い条件で実施され、小/中リーク規模の初期リークが5、6回破損伝播を繰返しながら、リーク規模を拡大させていく様子を連続的に模擬した実験で、LEAPコードの検証を行なうための試験であった。

本報告書は、これらの2回の総合試験の結果と同条件でのLEAPコードによる解析結果とを比較しながら、LEAPコードの検証を行なったものである。LEAPコードの取扱説明及びSWAT-3 Run-14、15の試験結果については、それぞれ別報告書¹⁾³⁾となっているので、重複を避けるため本書では取扱説明は行なわず、第2章に試験結果の概要を簡単に述べるに止める。

2. SWAT-3 Run-14, 15試験の概要

2.1 試験装置

両試験とも、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の伝熱管($31.8\text{ mm}^{\phi} \times 3.8\text{ mm}^t$)56本からなる管群モデルを試験体として、初期リーク位置を変えて注水試験を行なった。Fig. 2.1及び2.2にそれぞれRun-14, 15の伝熱管配列を示す。

2.2 試験条件

Table 2.1にRun-14及びRun-15の試験条件を示す。これら2回の試験の条件の違いは、上述した初期リーク孔の位置のほかに、水側条件の違いがある。すなわち、Run-14の場合は水加熱器内の条件が149ata, 240°C のサブクール条件であるのに対し、Run-15では、158ata, 346°C の飽和条件であった。また、初期リーク率は、Run-14, 15でそれぞれ18及び14g/secであった。

2.3 試験結果

Fig. 2.1及び2.2にそれぞれRun-14及び15の破損伝播の進行の様態を書き入れた。また、Fig. 2.3に両試験の水リーク率のタイム・ヒストリーを示し、Table 2.2に主な試験結果をまとめた。但し、ここで明記しておかなければならない事は、本報告書でのRun-15試験は第2回目のものであると言う事である。詳細はSWAT-3 Run-14, 15試験の報告書³⁾に記されているが、最初のRun-15試験は遂に破損伝播を生せず、従って次に水側条件を変えて初期水リーク率を上げて実施したのが本書で用いている第2回目の試験である。

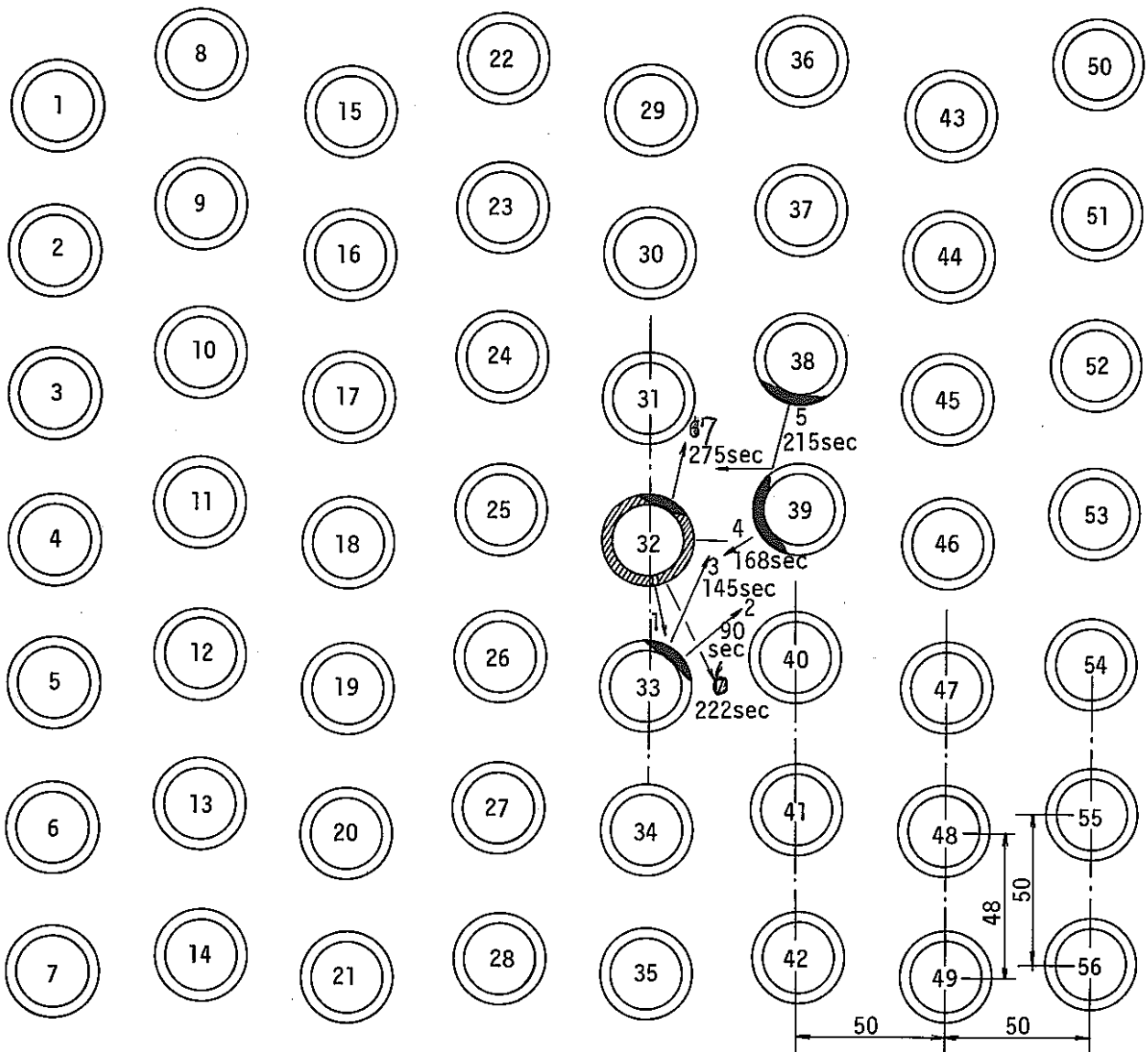


Fig. 2.1 Tube Configuration and Failure Propagation Profile in SWAT-3 Run-14 Test

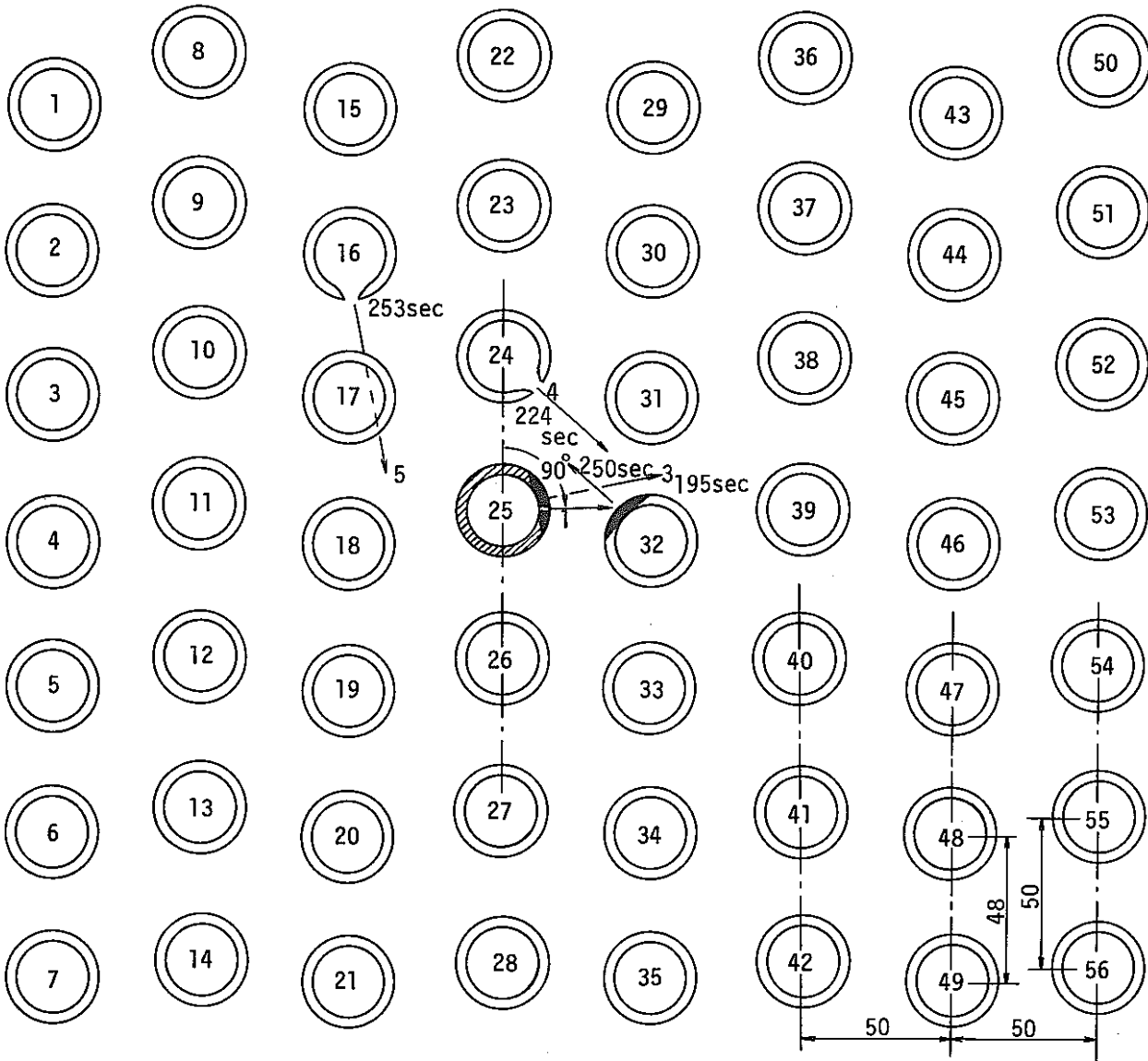


Fig. 2.2 Tube Configuration and Failure Propagation Profile in SWAT-3 Run-15 Test

Table 2.1 SWAT-3 Run-14, 15の試験条件

		Run - 14	Run - 15
伝熱管材質		2 $\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo 鋼 (STBA 24)	
伝熱管寸法		31.8 ϕ × 3.8 ^t × 700 ^ℓ	
伝熱管本数		56本 (直管)	
注 水 系	水加熱器圧力	149 ata	158 ata
	” 温度	240 °C (未飽和)	346 °C (飽和)
	水系配管温度	226 ~ 231 °C	333 ~ 336 °C
	初期ノズル孔径	0.5 mm ϕ	0.3 mm ϕ
	初期水リーク率	18 g / sec	14 g / sec
	注水時間	293 sec	311 sec
	全注水量	110 kg	132 kg
初期ナトリウム温度		341 °C	335 °C
ナトリウム流量		静 止	静 止
初期カバーガス圧		1.5 ata	1.5 ata

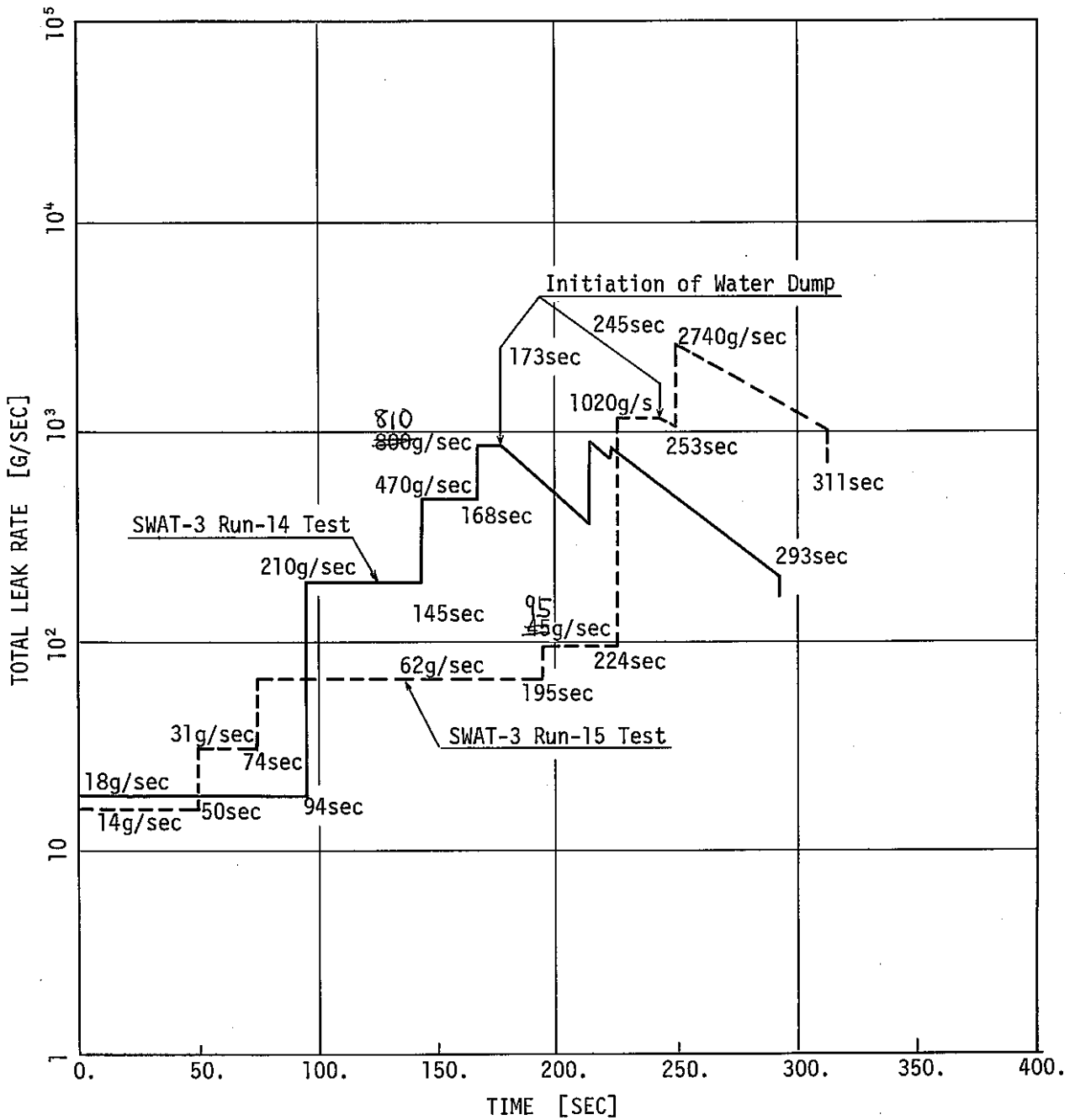


Fig. 2.3 Timing History of Total Water Leak Rate in SWAT-3 Run-14 and Run-15 Tests

Table 2.1 SWAT-3 Run-14, 15 試験の主な結果

Run No		14	15	
初期リーク孔径	mm ϕ	0.5	0.3	
水加熱器圧力	ata	149	158	
水加熱器温度	℃	240	346	
破 損 伝 播	1	水リーク率 g/sec	18	14
	次	時刻 sec	0	0
	2	水リーク率 g/sec	210	62
	次	時刻 sec	94	50
	3	水リーク率 g/sec	470	95
	次	時刻 sec	145	195
	4	水リーク率 g/sec	810	1,020
	次	時刻 sec	168	224
	5	水リーク率 g/sec	900	2,740
	次	時刻 sec	215	253
	6	水リーク率 g/sec	-	-
	次	時刻 sec	222	-
ブロー開始時刻	sec	173	245	
ブロー時間	sec	120	68	
総注水時間	sec	293	311	
総注水量	kg	110	132	
破損伝熱管 No		32→33→39→38→32	25→32→24→16	

3. 計算条件

3.1 体系

試験体系に関する諸条件は、試験条件に可能な限り合わせた。

- 伝熱管配列……………初期リーク管をNo.1としてFig.2.1及びFig.2.2に示す配列の伝熱管の中心座標(Appendix の Table A.1a 及び b 参照)を入力
- 伝熱管外径…………… 31.8 mm ϕ
- 伝熱管肉厚……………公称肉厚は 3.8 mm であるが、実際は平均 10% 増の 4.18 mm である。
- 初期注水ノズル位置……………

Run - 14 : No.32 の 281°	Run - 15 : No.25 の 0°
- 初期注水ノズル孔径……………

Run - 14 : 0.5 mm ϕ	Run - 15 : 0.3 mm ϕ

3.2 給水側条件

- 初期条件

Table 2.1 に示した水加熱器の状態量をSGの入口及び出口側ヘッダ条件として用いる。

- ブロー開始/終了時刻

試験結果に合わせて

Run - 14 : 4次破損後	Run - 15 : 4次破損後	5	とし、開始時刻はリーク
		21	

- ブロー中のヘッダ内状態量

試験結果での水加熱内の圧力挙動が Fig.3.1 (Run - 14) 及び Fig.3.2 (Run - 15) に示すように得られているので、これらの圧力カーブを計算上の水系の入口及び出口ヘッダ圧力として用いる。ただしエンタルピーはブロー中一定とする。Fig.3.1 及び 3.2 から読み取った入力データは巻末の Table A.2a 及び b に示す。

3.3 その他のパラメータ

- (1) 水噴出角度 (ANG J)

水噴出角度については R & D データにより水リーク孔径との関係が Fig.3.3 に示すように得られているので、これに従って水リーク率と水噴出度との関係に直して入力した。入力値は Table A.3a 及び b に示す。

- (2) タイム・メッシュ (DT)

タイム・メッシュには入力値固定のものと、ブローまでは自動的に求められた最適値を用い

るものとの2通りがある。従って前者の方法で $DT = 1 \text{ sec}$ の場合と、後者の方法で $DT = 1, 2$ 及び 5 sec の場合との4ケースについて計算を行なった。

(3) 伝熱管肉厚 (TUBT) 及び貫通肉厚 (PENETT)

SWAT-3 試験で使用した伝熱管の肉厚は公称値 3.8 mm であるが、実際は平均 4.18 mm である。従ってこれらの2つの値と「もんじゅ」での腐蝕代を考慮した設計値 3.13 mm 3 ケースについて計算を行なった。貫通肉厚は伝熱管肉厚の20%とした。

(4) ジェット衝突点公差 (TOLRNS)

複数のジェット衝突点と同じ伝熱管の外周角度のある範囲内に入ると、そのジェット衝突点を同一のものと見做しているが、この基準角を公差と呼び入力パラメータとなっている。ここでは、公差として $5^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 及び 90° の5ケースを選んだ。

(5) ジェット分割数 (NJET)

ジェット分割数として $25, 50$ 及び 100 を選んだ。

(6) 最大破損孔径 (DLMX)

最大破損孔径は破損伝熱管孔径の上限値で、Fig.3.4に示すようにR&Dデータを基に、伝熱管内部が過熱蒸気条件の場合には伝熱管1本の完全両端破断 (DEG) 相当の値を用いているが、サブクール又は飽和水条件の場合にはそのような大開孔を考慮する必要は無いと考えられる。従ってここでは各試験での破損孔の最大孔径：すなわち Run-14 では 5.8 mm^ϕ 、Run-15 では 8.5 mm^ϕ を DLMX に入力した。

以上の要領で入力データを作成した。入力データは Appendix の Table A.4 に添付する。

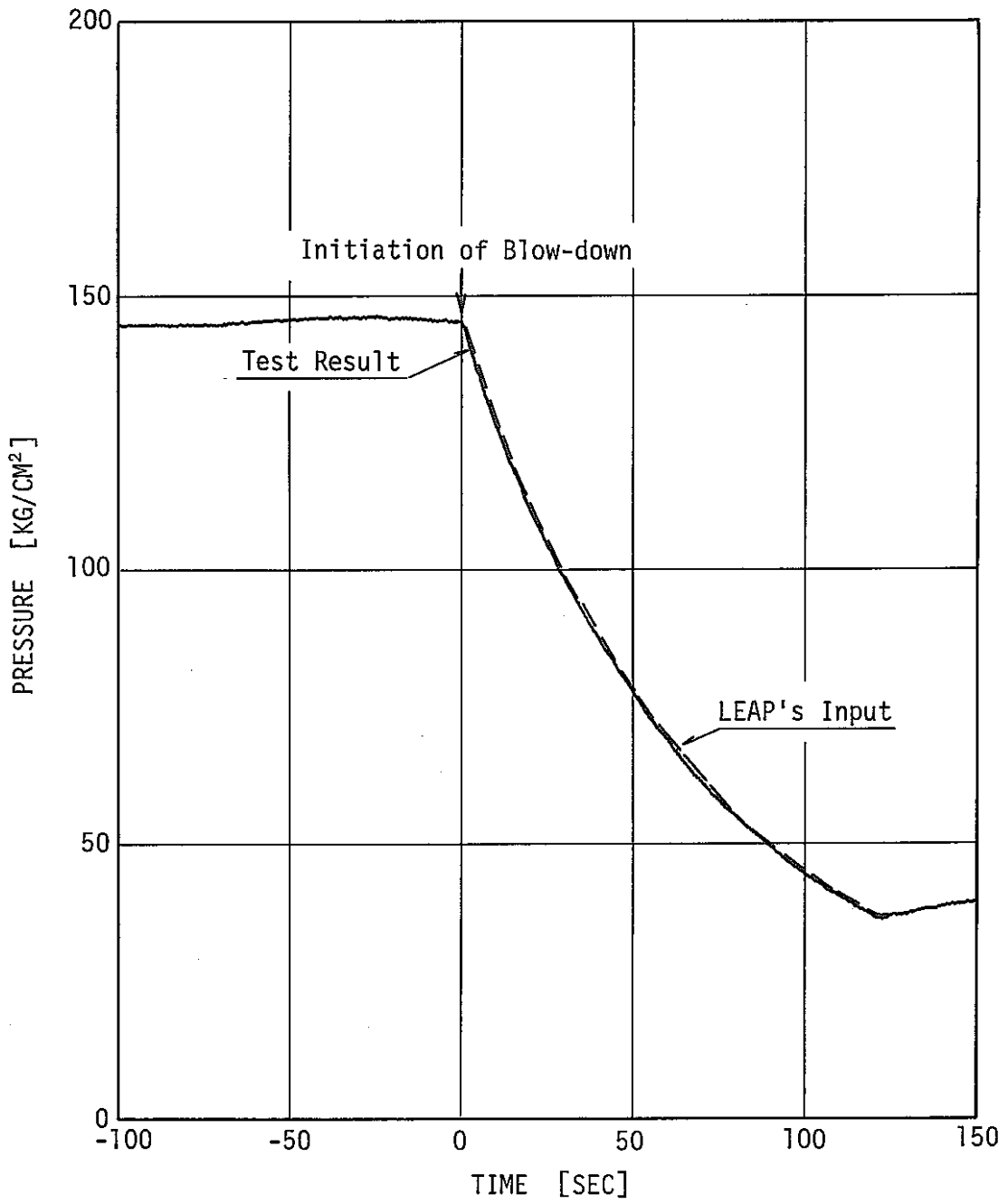


Fig. 3.1 Water Header Pressure Decrease during Blow-down in SWAT-3 Run-14

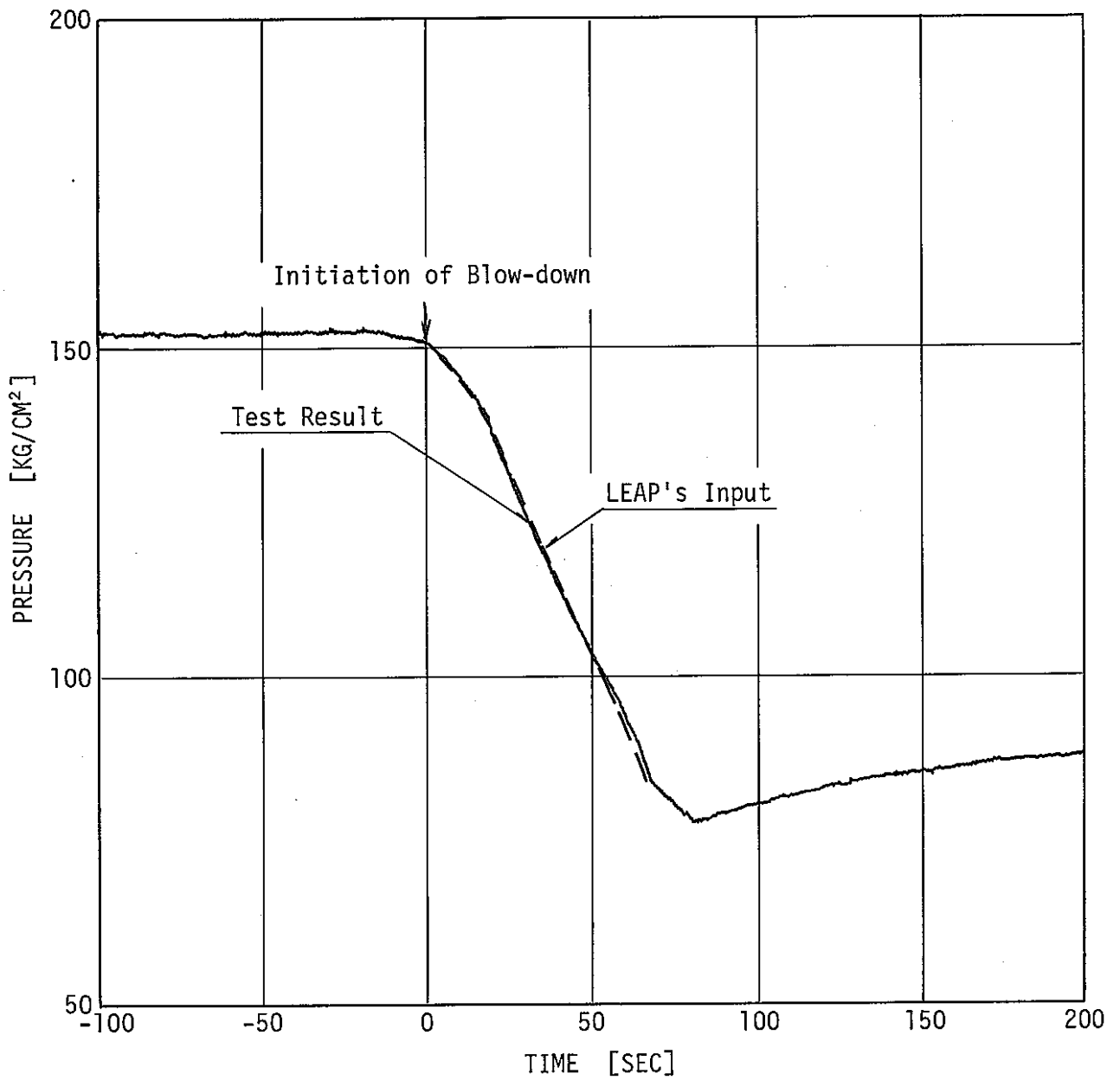


Fig. 3.2 Water Header Pressure Decrease during Blow-down in SWAT-3 Run-15

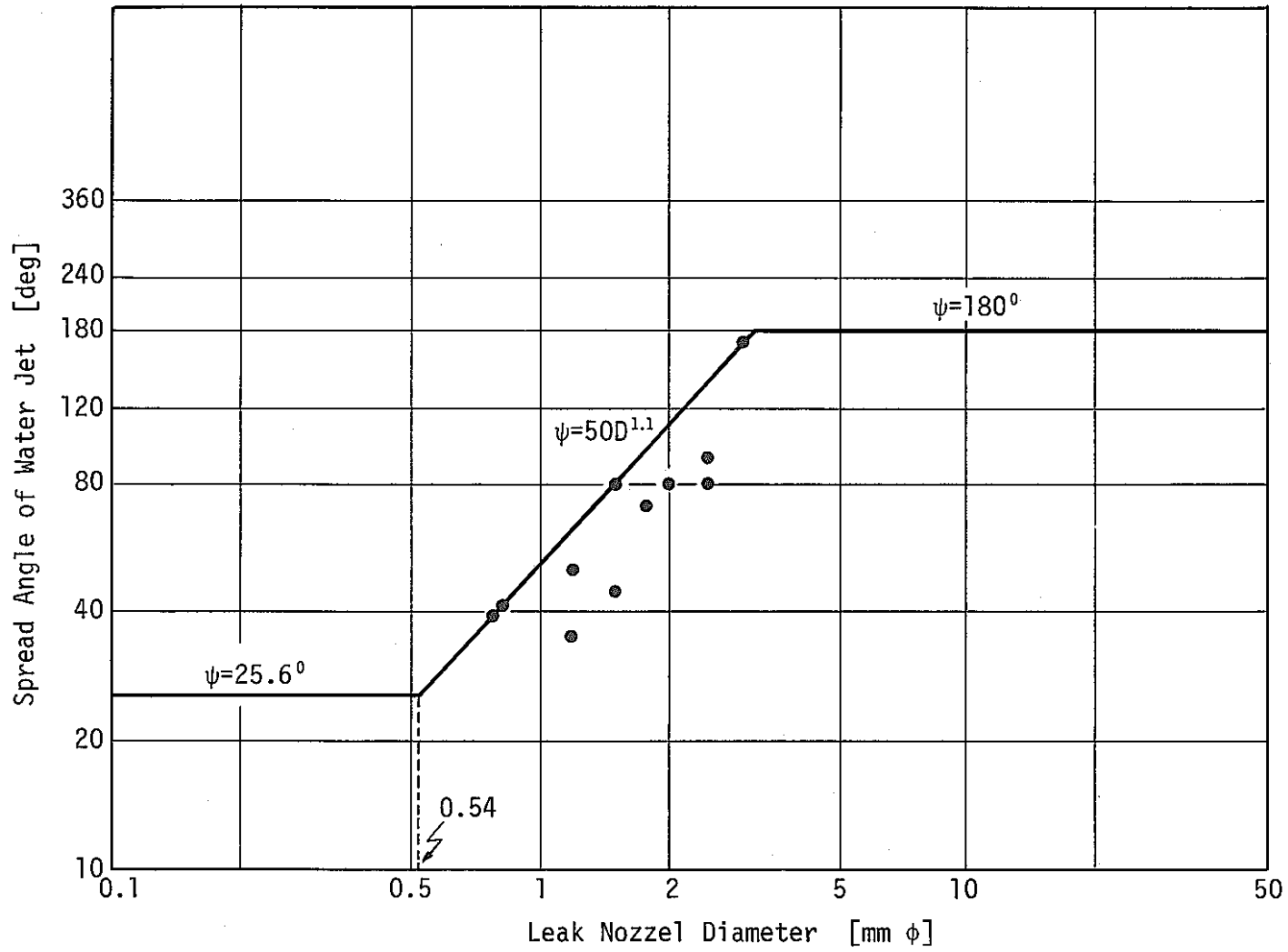


Fig. 3.3 Relation between the Spread Angle of Water Jet and Leak Nozzle Diameter

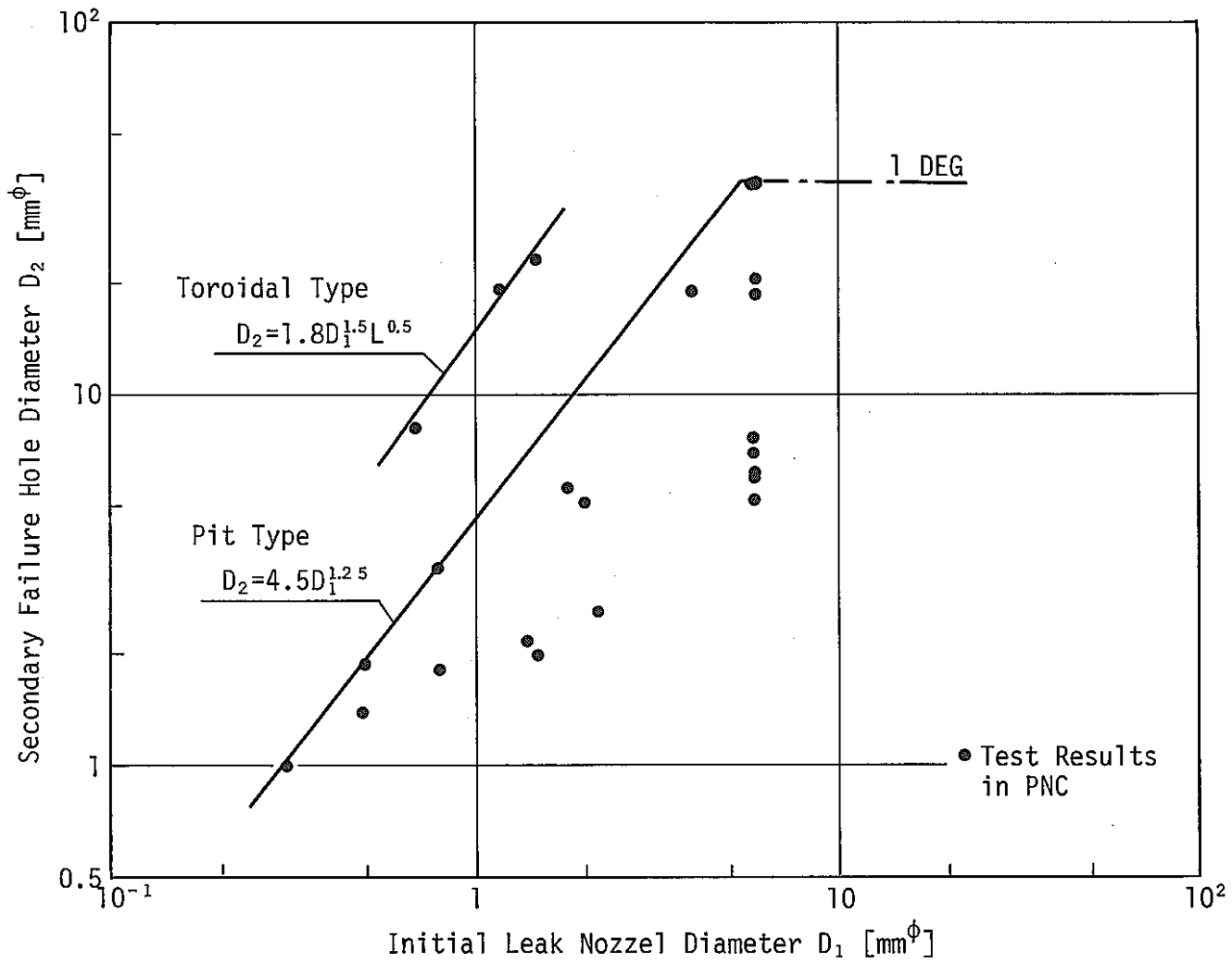


Fig. 3.4 Relation between Initial Leak Nozzle Diameter and Secondary Failure Hole Diameter

4. 計算結果の検討

4.1 パラメータ・サーベイ

Table 4.1 a 及び b にパラメータ・サーベイを行なった各ケースの主な結果、計算時間などをRun-14 及びRun-15 についてそれぞれ示す。以下、各パラメータ・サーベイの結果を述べる。

4.1.1 タイム・メッシュ (DT)

タイム・メッシュDTの変更は計算結果にほとんど影響を与えなかった。破損次数、破損管の位置などは全く同じであった。Table 4.1 bの最大リーク率の値が少しづつ異なるのは、これらの最大リーク率に到達した破損伝播が水系ブロー中の現象であるため、タイム・メッシュの違いによる発生時刻の小さなズレがブローによる圧力降下の差を生じたためであり、本質的な差とは言えない。

計算時間は当然の事ながらタイム・メッシュが大きい程少なくて済み、DT=5 sec ではDT=1 sec の場合の1/4 ~ 1/5 となっており、おおよそ反比例の関係が見られる。また、タイム・メッシュ固定の場合は可変の場合の20 又は70% 増の計算時間を要している。

4.1.2 ジェット分割数 (NJET)

ジェット分割数NJETをパラメータに振った計算では、Run-14 条件では結果に差は現われなかったが、Run-15 条件の計算では3 ケースとも異なる結果となった。Fig.4.1 に示すようにNJET=100, 50, 25 の順に4 次破損発生が遅くなり、その後の挙動も異なっている。これは、ジェット分割数が少ないケースでは、ターゲット管と交差する分割線も少なくなるため最大ウェステージ率の値も分割が密な場合に比べて低下するためである。Run-15 条件でNJET=200 で計算した場合の結果はNJET=100 の場合と全く同じであった。Run-14 条件の計算でNJETの値が計算結果に効かなかったのは、これらの場合Run-15 と異なり破損次数が少なかったためと思われる。すなわち破損伝播が進行して破損次数が大きくなればNJETの違いによる影響はRun-14 条件の場合も当然現われると考えられる。以上の事からジェット分割数は多い程正確な計算が行なえる事になるが、実際上は100 程度で問題無いと言える。

4.1.3 ジェット衝突点の公差 (TOLRNS)

公差の変更は計算結果に少なからぬ影響を与える。Fig.4.2 a 及び b に公差をパラメータとしたRun-14 及びRun-15 条件での計算結果をそれぞれ示す。公差のとり方によって4

次破損以後の様子はかなり異なって来る事が判る。これは、公差が小さい場合は同じ伝熱管上の既にかいた破損孔の近くに再び破損孔が形成される事が許されるため、それ以後の破損伝播進行状況も異なってくるからである。また、公差をどう選ぶ方が結果が安全側となるかと言ったような定性的な傾向は認められない。また実験値との比較と言う意味では、解析側がかなり保守的な評価をしているため、どの値が特に実験との対応が良いと言う事もできない。以上の事から、現状では公差の推奨値を挙げる事はできないが、公差の違いによる最大リーク率の値の違いが2～3倍の範囲に入っているため、安全評価の際にはこの点を考慮すれば、特にどの値を用いても問題は無いと考えられる。

4.1.4 伝熱管肉厚 (TUBT) 及び貫通肉厚 (PENETT)

伝熱管肉厚及び貫通肉厚の変更は、Fig. 4.3に示すように、当然の事ながら破損伝播時間に影響を与えた。ブロー開始以前は、肉厚の薄い方の破損伝播時間が全体的に早まるだけで、破損伝播進行状況(伝熱管Noや破損順序)全く相似であるが、ブロー開始以後は水側圧力降下の影響が相対的に異なるため破損伝播進行状況には差が見られる。一般に、伝熱管肉厚の薄い方が、最大リーク率も大きくなる傾向が見られる。

4.1.5 最大破損孔径 (DLMX)

破損孔径の上限値は計算結果に定性的な影響を与える。すなわち、上限値が大きくなると4次破損以後での水リーク率の増大率が大きくなるため最大リーク率も大きくなる。Run - 14及び15の条件での解析の結果をそれぞれFig. 4.4 a及bに示す。

4.2 Run - 14 試験結果との比較

Run - 14 試験結果と同条件での計算結果の代表的ケース (R14REF) とのタイム・ヒストリーでの比較を Fig. 4.5 に示す。この図から計算結果の方が破損伝播時間も早く、破損規模も大きくと言う意味で、常に結果的に安全側の値を与えている事が判る。このような傾向を示す理由としては、LEAPコードの中でナトリウム-水反応の試験研究成果から導いた実験式を用いている箇所が、ウェステージ率計算式 (Fig. 4.9 参照)、破損孔径計算式 (Fig. 3.4 参照) などにあるが、これらの式を導く際に、常にベスト・フィットではなく、安全側の結果を与えるものとして導いたためである。

Fig. 4.6 は、破損伝播の進行の様子を計算ケース R14REF の結果について示したものである。Fig. 2.1 との比較から2次破損管だけは試験結果と一致するものの、3次破損管以降は全く対応していない。これは、LEAPコードにおいては保守的な評価を常に行うように、リーク孔から見て他の伝熱管の影に当たる伝熱管に対するウェステージも考慮しているため、たとえばNo.34の伝熱管が破損すると言うような計算結果になったものである。このようなLEAPコードの持

っている種々の保守性のため、破損伝熱管や破損孔位置等の実験と計算とでの対応は必ずしも良いものではない。

4.3 Run - 15 試験結果との比較

代表的ケース (R15REF) の計算結果から、総水リーク率のタイム・ヒストリーを Fig. 4.7 に示す。なお、Run - 15 試験では、第 2 章で述べた事情から 2 次破損時刻については本来ならばもっと遅れたであろうと推定されるが、その時刻を求める事はできないので、試験結果の 2 次破損時刻を解析値のものに合わせて、3 次破損以後についての比較を実施した。Run - 14 に関する比較で述べたように、この場合も計算結果の方が時間的にも保守側となっている。そして、その理由も同じくコード内で用いている実験式の保守性によるものである。

Fig. 4.8 は破損伝播進行図であるが、Fig. 2.2 との比較からやはり破損伝熱管の対応は一致していない事が判る。

Table 4.1a Run - 14 解析の各ケースの主な結果

Case No	タイム メッシュ	ジェット 分割数	肉 厚	公 差	最大破損 孔 径	最 大 リ ーク 率	同 発 生 刻 時	ブ ロ ー 終 了 時 刻	破 損 ス テ ッ プ 数	CPU 時間
R14 REF	1 sec	100	4.18 mm	30°	5.73 mm ϕ	3.52 kg/s	109 sec	236 sec	3	202 sec
R14 T2	2 sec	↑	↑	↑	↑	3.52	109	237	3	105
R14 T5	5 sec	↓	↓	↓	↓	3.52	109	237	3	45
R14 TC	(完全固定) 1 sec	100	↓	↓	↓	3.52	110	237	3	242
R14 M2	1 sec	25	↓	↓	↓	3.53	108	236	3	153
R14 M3	↑	50	4.18 mm	↓	↓	3.53	108	236	3	171
R14 L2	↑	100	3.80 mm	↓	↓	3.47	99	227	4	222
R14 L3	↑	↑	3.13 mm	30°	↓	4.41	209	210	5	276
R14 A2	↑	↑	4.18 mm	5°	↓	4.28	182	237	4	231
R14 A3	↑	↑	↑	10°	↓	3.52	109	236	3	200
R14 A4	↑	↑	↑	60°	↓	4.64	168	236	4	236
R14 A5	↑	↑	↑	90°	5.73 mm ϕ	8.44	168	237	5	324
R14 D8	↓	↓	↓	30°	8.50 mm ϕ	6.43	109	236	3	198
R14 DG	1 sec	100	4.18 mm	30°	3.32 mm ϕ	8.25	109	236	3	200

Table 4.1b Run - 15 解析の各ケースの主な結果

Case No	タイム メッシュ	ジェット 分割数	内厚	公差	最大破損 孔径	最大 リーク率	同発 生刻 時	ブロー 終了時刻	破損 ステップ数	CPU 時間
R 15 REF	1 sec	100	4.18 mm	30°	8.5 mm ϕ	8.93 kg/sec	321 sec	364 sec	7	163 sec
R 15 T2	2 sec	↑	↑	↑	↑	8.92	321	365	7	89
R 15 T5	5 sec	↓	↓	↓	↓	8.88	321	365	7	44
R 15 TC	(完全固定) 1 sec	100	↓	↓	↓	8.94	322	366	7	279
R 15 M2	1 sec	25	↓	↓	↓	10.93	311	379	8	136
R 15 M3	↑	50	↓	↓	↓	12.41	322	370	8	170
R 15 M4	↑	200	4.18 mm	↓	↓	9.06	320	364	7	243
R 15 L2	↑	100	3.80 mm	↓	↓	9.40	294	341	7	177
R 15 L3	↑	↑	3.13 mm	30°	↓	9.98	246	298	7	198
R 15 A2	↑	↑	4.18 mm	5°	↓	9.90	312	364	5	171
R 15 A3	↑	↑	↑	10°	↓	9.90	312	364	6	173
R 15 A4	↑	↑	↑	60°	↓	5.03	158	239	4	180
R 15 A5	↑	↑	↑	90°	8.5 mm ϕ	5.03	158	240	3	177
R 15 D2	↑	↑	↓	30°	5.73 mm ϕ	5.31	271	330	11	201
R 15 DG	1 sec	100	4.18 mm	30°	33.2 mm ϕ	16.64	315	365	4	146

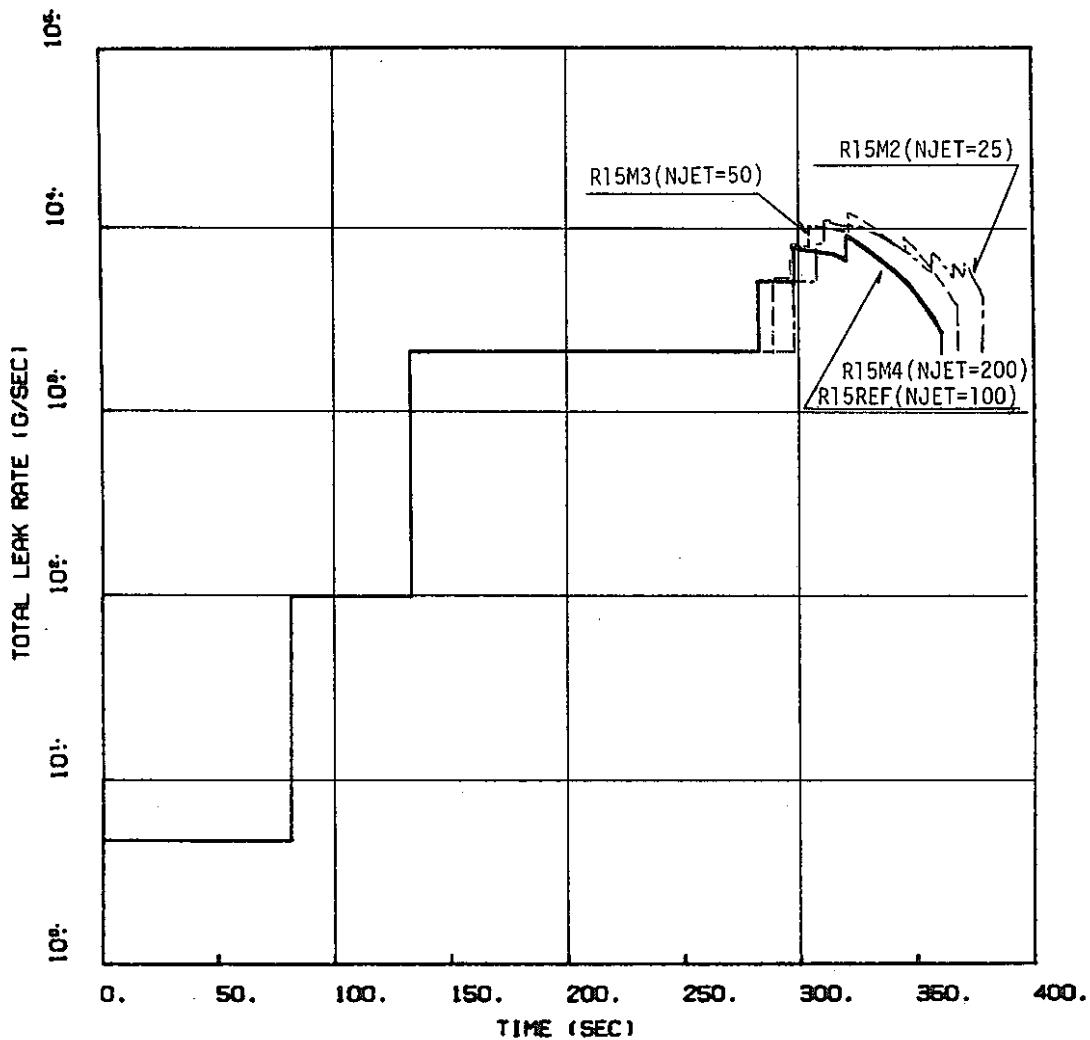


Fig. 4.1 Comparison of Calculated Water Leak Rate Histories among the Cases of NJET=25, 50, 100, and 200 (SWAT-3 Run-15)

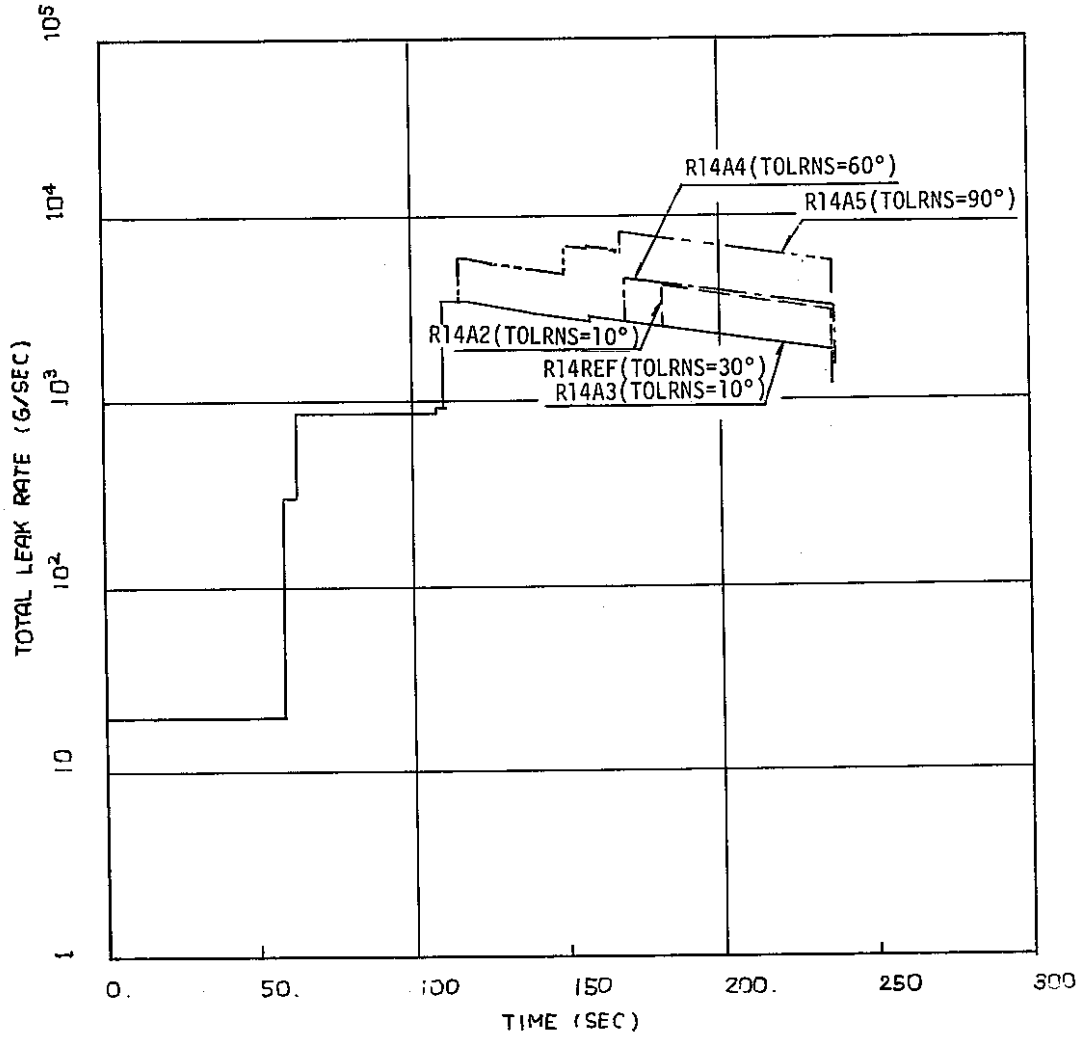


Fig. 4.2a Comparison of Calculated Water Leak Rate Histories among the Cases of TOLNS=5°, 10°, 30°, 60°, and 90° (SWAT-3 Run-14)

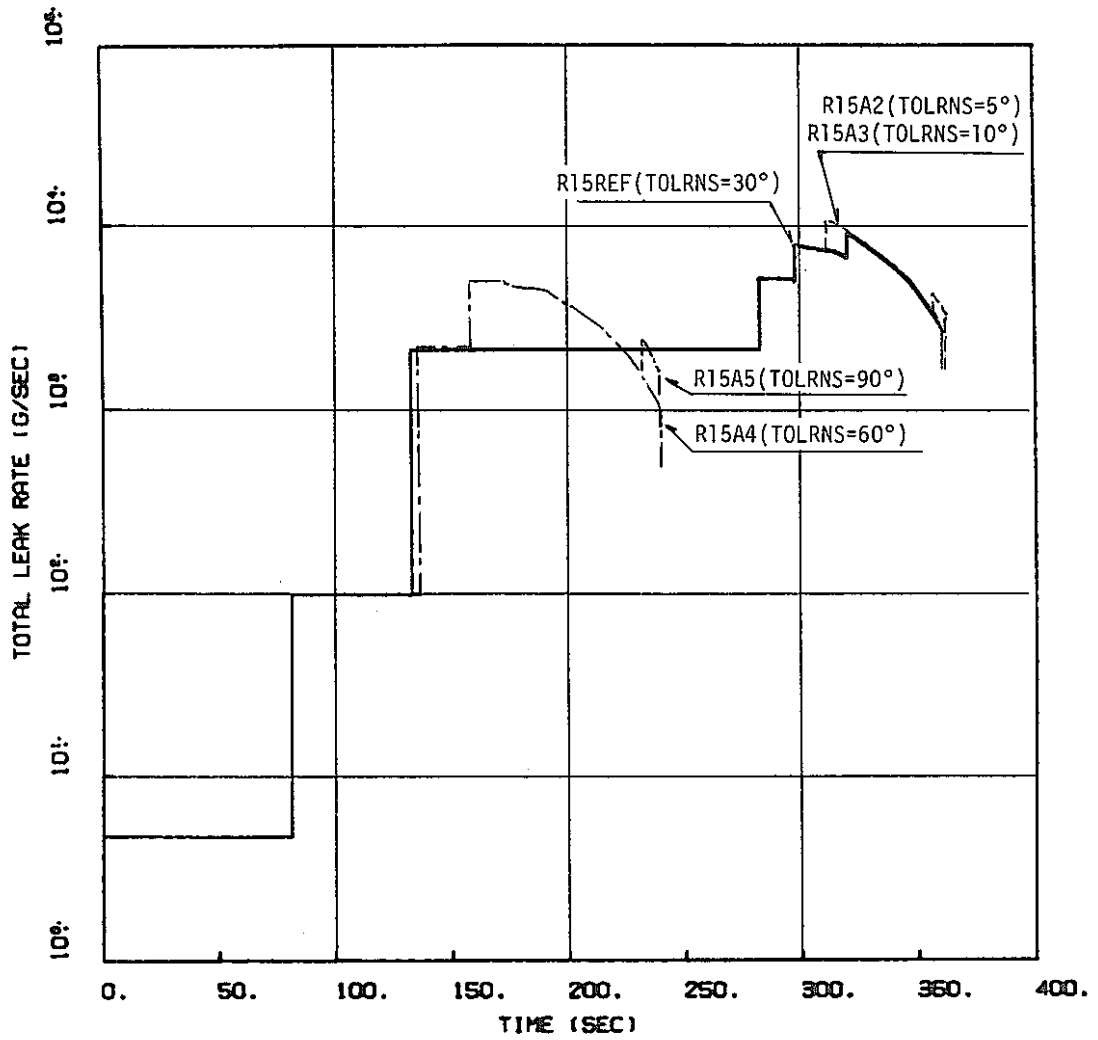


Fig. 4.2b Comparison of Calculated Water Leak Rate Histories among the Cases of TOLRNS=5°, 10°, 30°, 60°, and 90° (SWAT-3 Run-15)

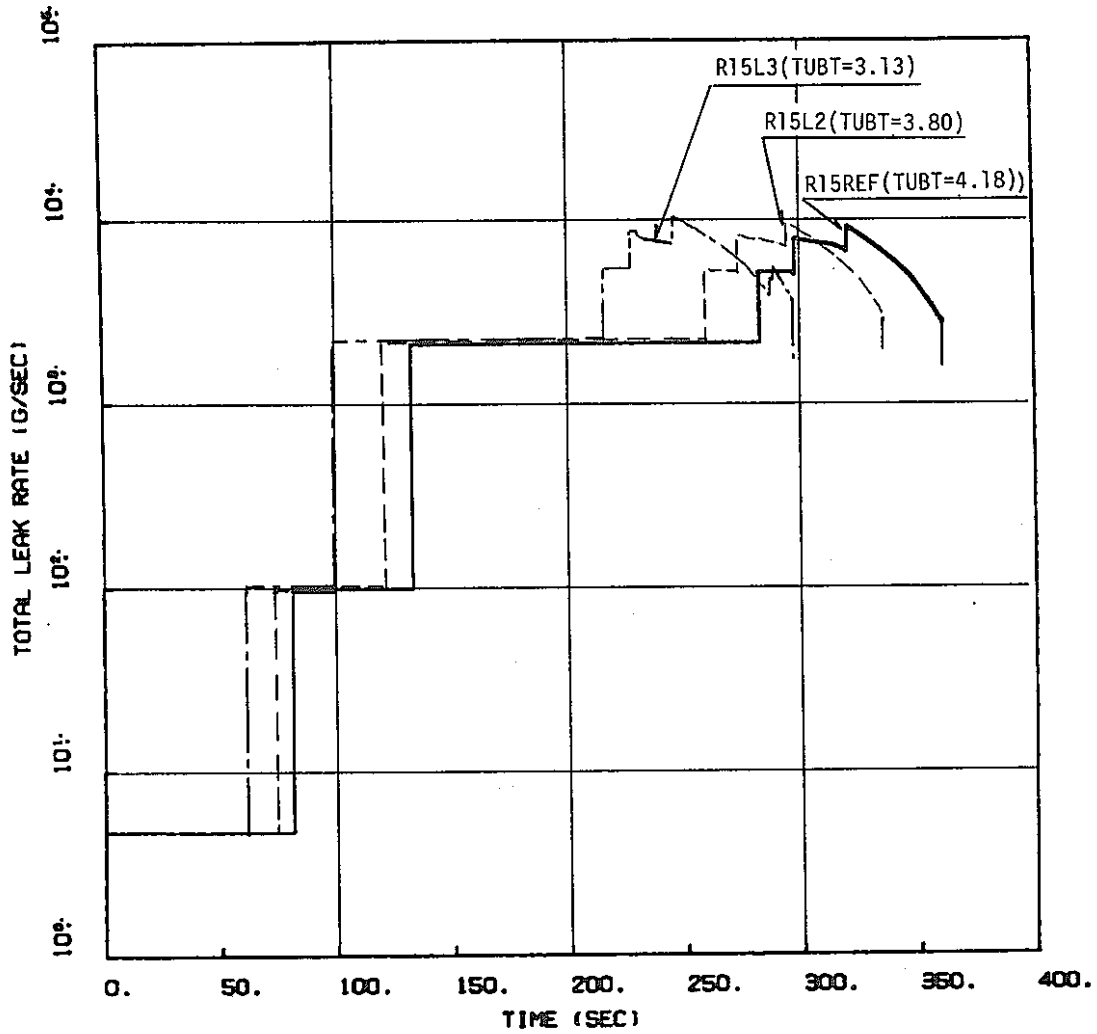


Fig. 4.3 Comparison of Calculated Water Leak Rate Histories among the Cases of Tube Wall Thickness TUBT=4.18, 3.80, and 3.13mm (SWAT-3 Run-15)

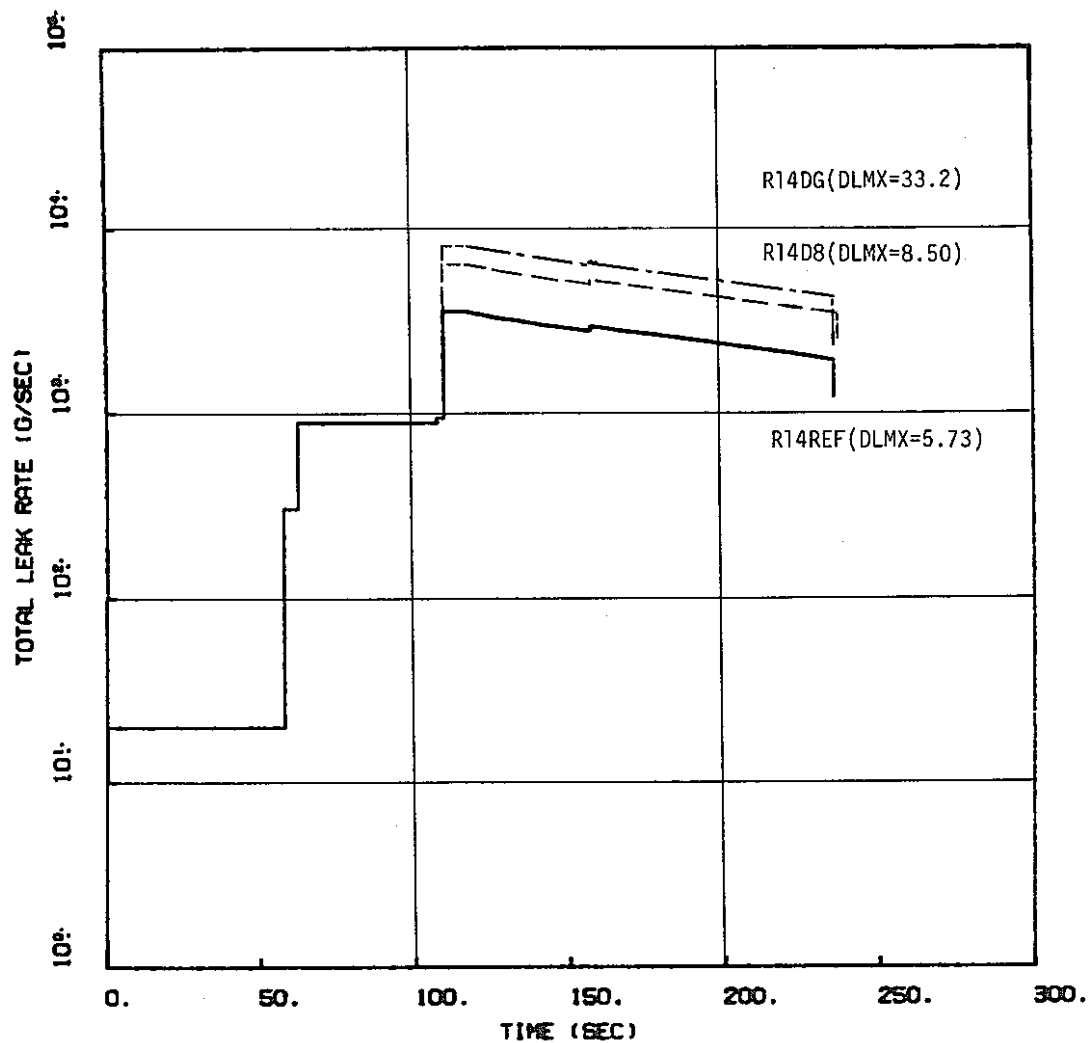


Fig. 4.4a Comparison of Calculated Water Leak Rate Histories among the Cases of Maximum Failure Hole Diameter DLMX=5.73, 8.5, and 33.2 (SWAT-3 Run-14)

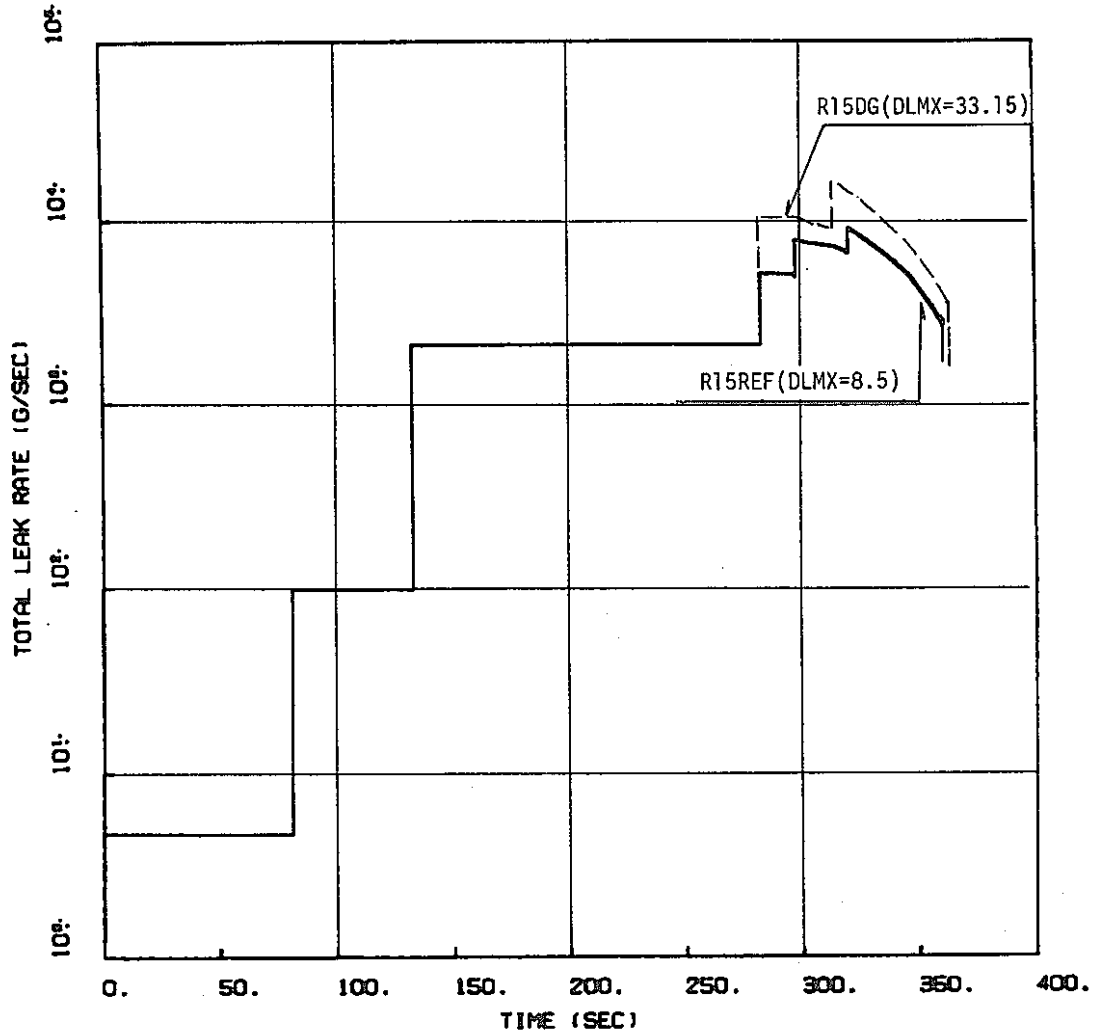


Fig. 4.4b Comparison of Calculated Water Leak Rate Histories between the Cases of Maximum Failure Hole Diameter DLMX=8.50, and 33.2 (SWAT-3 Run-15)

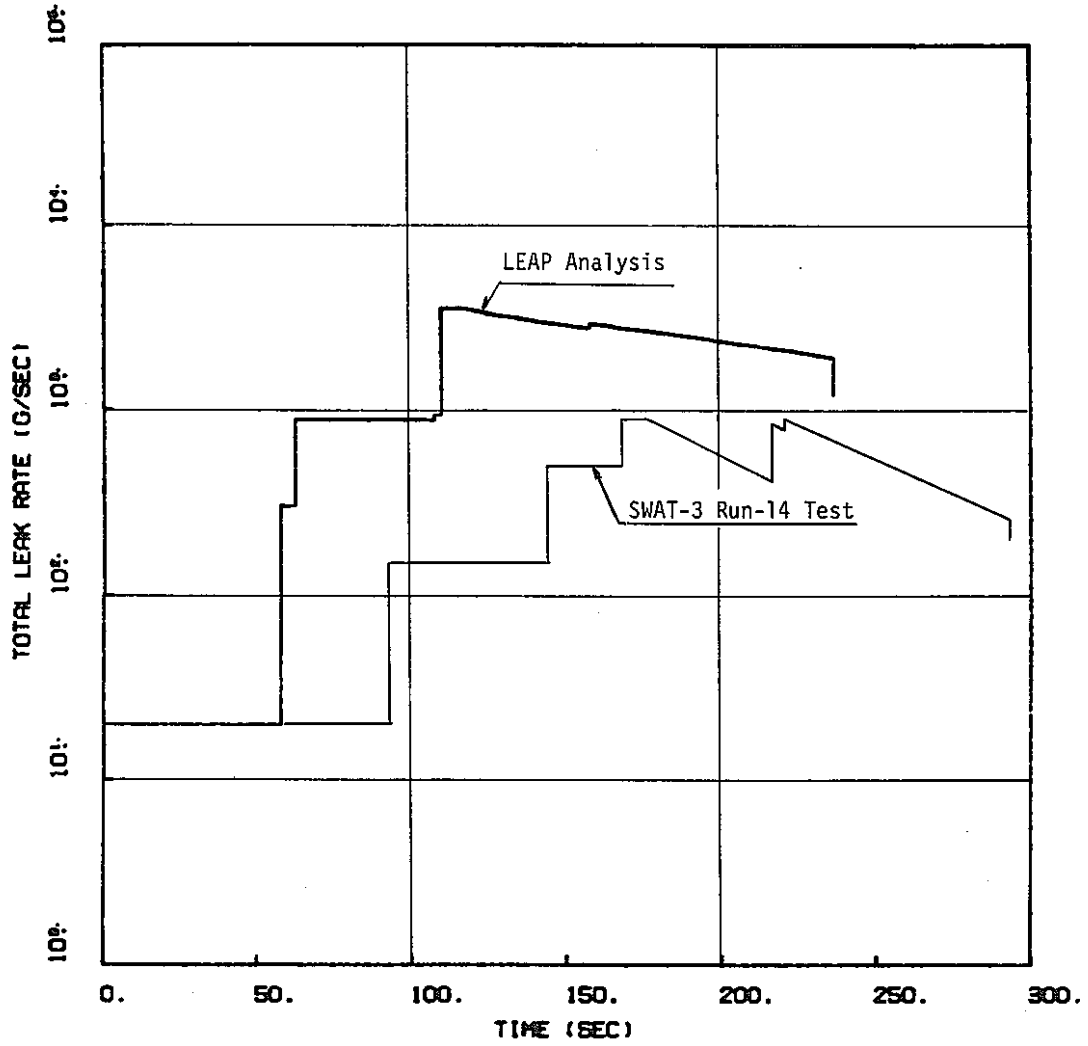
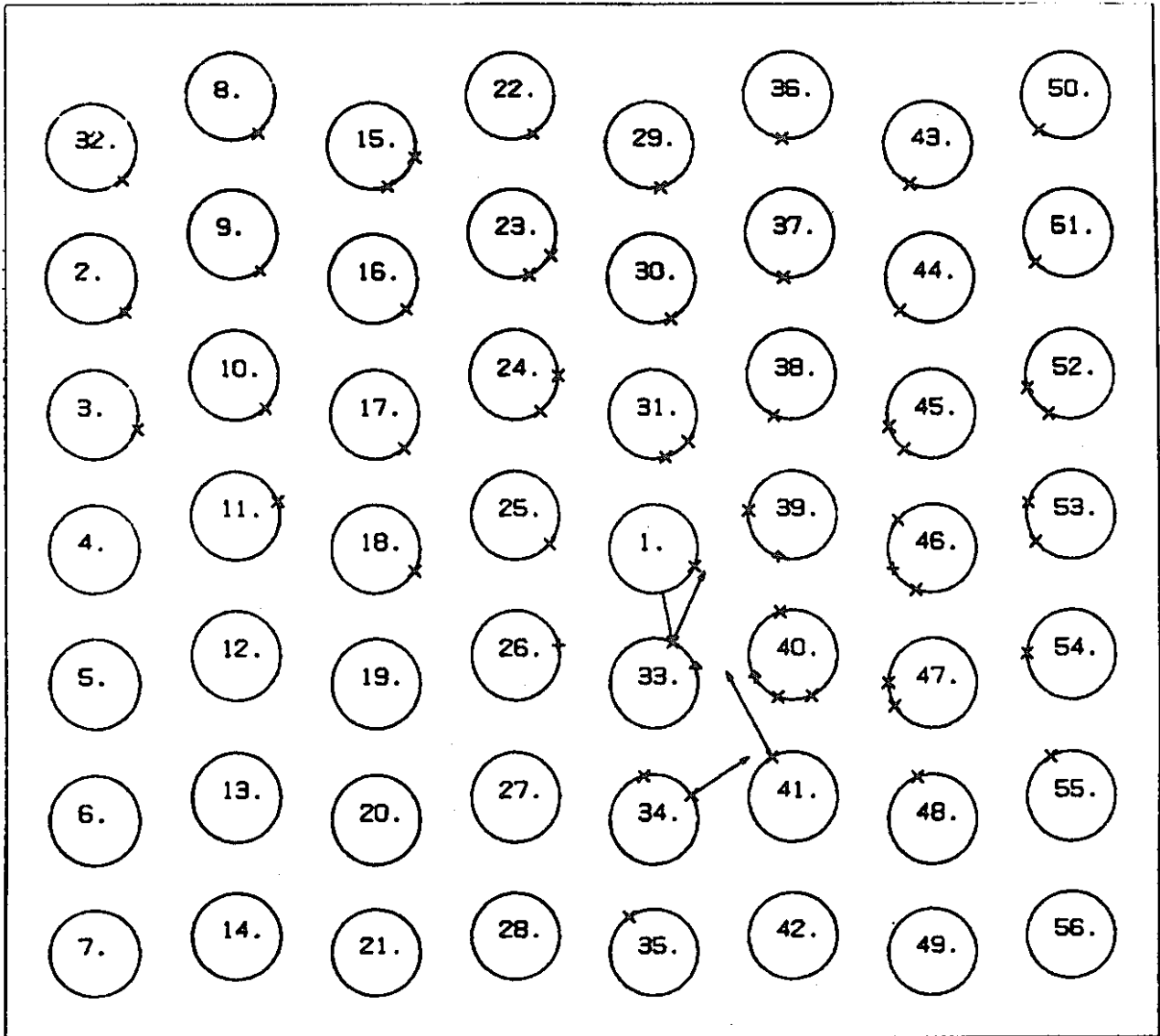


Fig. 4.5 Comparison between the Run-14 Test Result and LEAP Analysis



TIME = 109.35

Fig. 4.6 Failure Propagation Process of Run-14 Analysis by LEAP

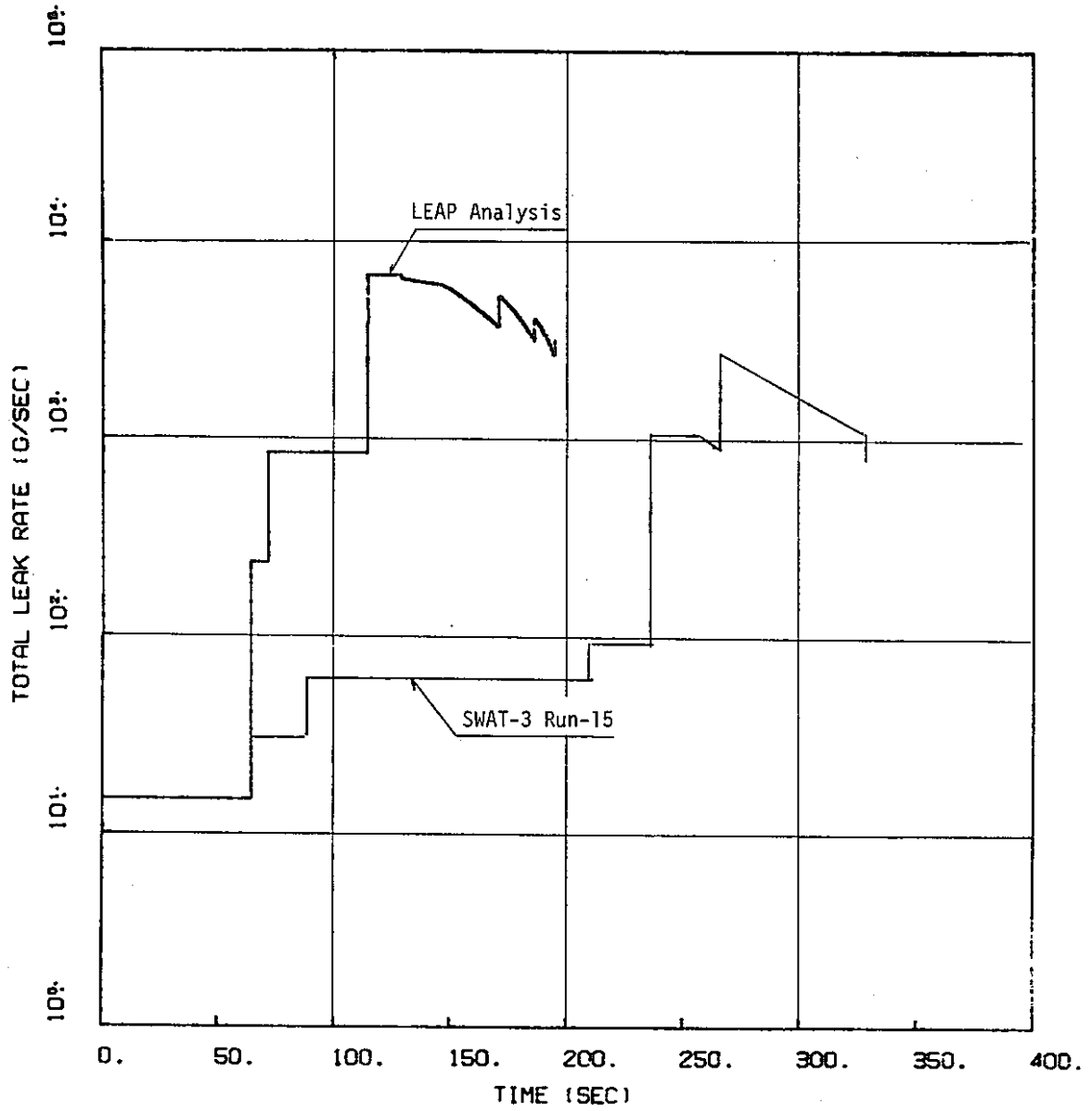
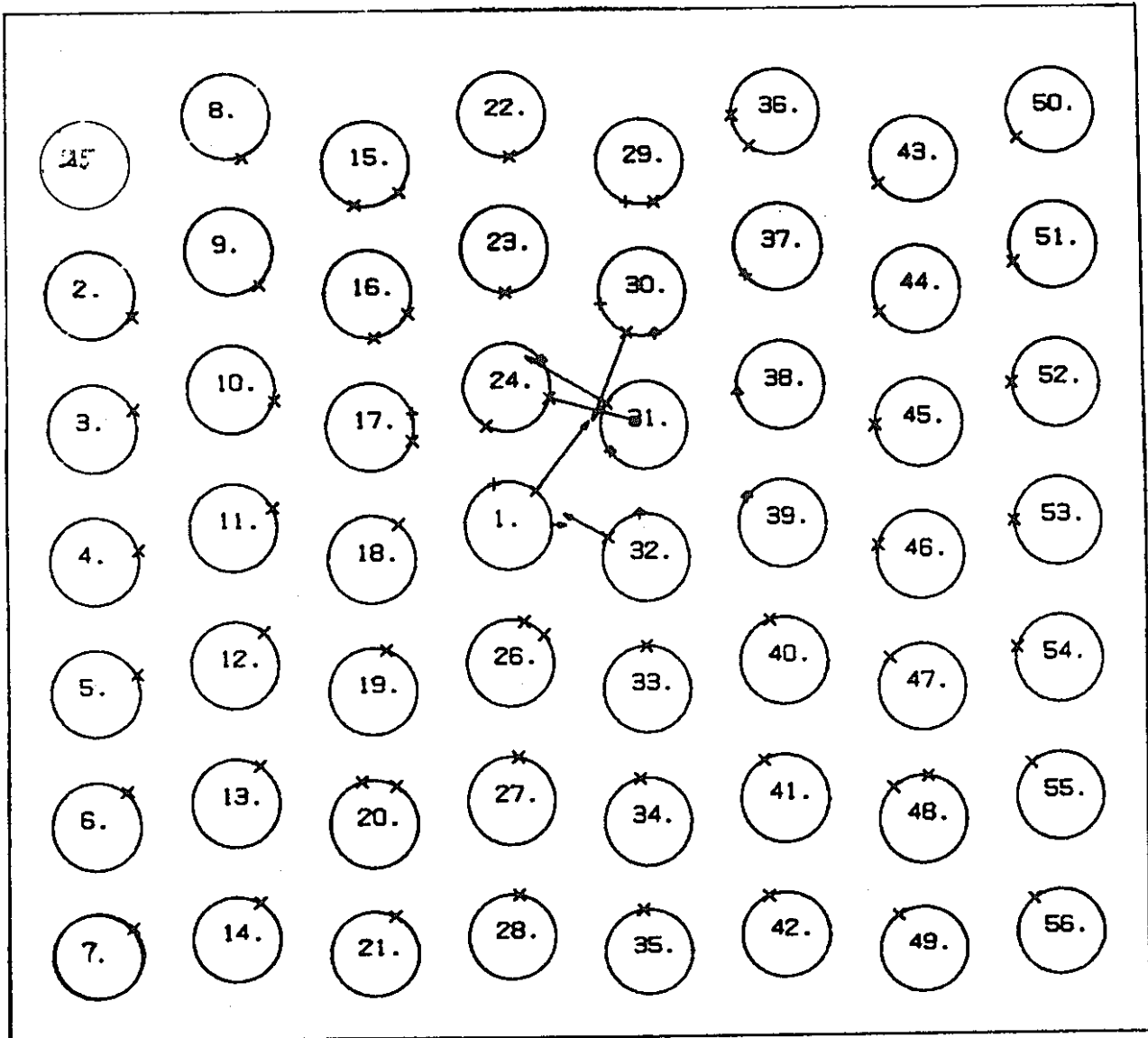


Fig. 4.7 Comparison between the Run-15 Test Result and LEAP Analysis



TIME = 320.58

Fig. 4.8 Failure Propagation Process of Run-15 Analysis by LEAP

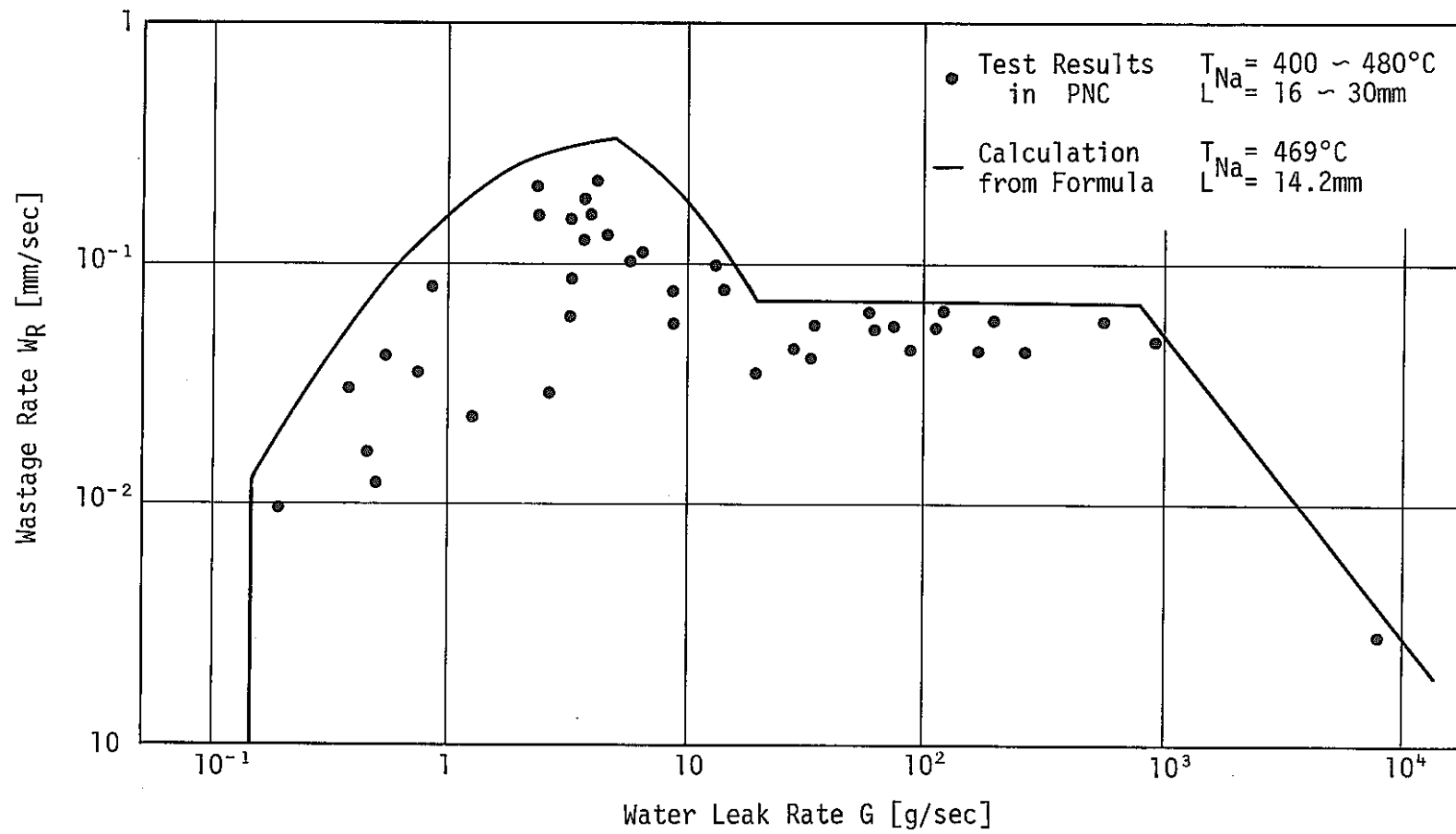


Fig. 4.9 Relation between Water Leak Rate and Wastage Rate

5. ま と め

高速増殖炉の蒸気発生器における伝熱管破損伝播現象を解析するために、計算コードLEAPが開発された。このLEAPコードを検証するために、SWAT-3破損伝播試験Run-14及びRun-15の解析を実施し、両者の比較から以下の結果を得た。

1) 解析パラメータの検討

- ・タイム・メッシュは少なくとも1 sec～5 secの範囲では計算結果に大きな影響を与えず、また計算時間はタイム・メッシュにほぼ反比例する。
- ・ジェット分割数は100程度で充分である。
- ・ジェット衝突点公差は計算結果に影響を与える。しかし現状では、どのような公差の値が保守的だとか、試験結果に近いとか言う事はできない。公差の違いが計算結果の最大リーク率に及ぼす影響は、2～3倍である。
- ・破損孔の上限は計算結果に与える影響がはっきりしており、上限が大きいほど最大リーク率も増大すると言える。

2) 実験結果との比較

Run-14, 15を通して、計算結果の方が破損伝播時間の上でも破損規模の上でも常に保守的な傾向を示している。これらの保守性はLEAPコード内で使用している実験式の保守性に基くものである。

破損伝熱管の実験と解析との対応はあまり良くない。この原因は、計算側で他の伝熱管の影に当たる伝熱管についてもウェステージを考慮する等の保守性に起因するものである。

3) 総合評価

本コードは試験結果に比べて明らかに保守的な評価を行なう事のできるプログラムである。従って、たとえば「もんじゅ」に設計基準リークの解析等のようにその特性に合った使い方をすれば充分目的を達成することができる。しかしながら本コードの本来的に持っている保守性のため実現象との対応は不完全であり、そのためリーク発生時のプラグ管の推定と言うような目的には、まだ適しているとは言えない。後者の目的に沿った使い方をするためには、前者用の解析コードと完全に区別し、現LEAPコードの有する保守性を無くす必要がある。

6. 参 考 文 献

- 1) 田辺裕美, 三宅収, 大後美道, 佐藤稔, 「蒸気発生器伝熱管の破損伝播解析コード LEAPII (使用説明書)」 PNC ZN952 82-04 (1982)
- 2) H. Tanabe, Y. Daigo, O. Miyake, M. Sato, M. Hori, T. Takahashi, Y. Ohmori, Y. Kani, K. Takitani, "Analysis of Leak Propagation for DBL Selections of MONJU Steam Generators" DOE/PNC Second Joint LMFBR Steam Generator Seminar PNC Paper No. C-3, PNC SA013 KWG81-03 (1981)
- 3) 田辺裕美, 佐藤稔, 藤井啓次, 大後美道, 「蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) による破損伝播試験Ⅲ」 PNC SN941 82-99 (1982)

APPENDIX

Table A.1a 伝熱管中心座標 (Run - 14)

伝熱管No	X 座 標	Y 座 標	伝熱管No	X 座 標	Y 座 標
1	200.0	144.0	2	0.0	240.0
3	0.0	192.0	4	0.0	144.0
5	0.0	96.0	6	0.0	48.0
7	0.0	0.0	8	50.0	306.0
9	50.0	256.0	10	50.0	206.0
11	50.0	156.0	12	50.0	106.0
13	50.0	56.0	14	50.0	6.0
15	100.0	288.0	16	100.0	240.0
17	100.0	192.0	18	100.0	144.0
19	100.0	96.0	20	100.0	48.0
21	100.0	0.0	22	150.0	306.0
23	150.0	256.0	24	150.0	206.0
25	150.0	156.0	26	150.0	106.0
27	150.0	56.0	28	150.0	6.0
29	200.0	288.0	30	200.0	240.0
31	200.0	192.0	32	0.0	288.0
33	200.0	96.0	34	200.0	48.0
35	200.0	0.0	36	250.0	306.0
37	250.0	256.0	38	250.0	206.0
39	250.0	156.0	40	250.0	106.0
41	250.0	56.0	42	250.0	6.0
43	300.0	288.0	44	300.0	240.0
45	300.0	192.0	46	300.0	144.0
47	300.0	96.0	48	300.0	48.0
49	300.0	0.0	50	350.0	306.0
51	350.0	256.0	52	350.0	206.0
53	350.0	156.0	54	350.0	106.0
55	350.0	56.0	56	350.0	6.0

Table A.1b 伝熱管中心座標 (Run - 15)

伝熱管No	X 座 標	Y 座 標	伝熱管No	X 座 標	Y 座 標
1	150.0	156.0	2	0.0	240.0
3	0.0	192.0	4	0.0	144.0
5	0.0	96.0	6	0.0	48.0
7	0.0	0.0	8	50.0	306.0
9	50.0	256.0	10	50.0	206.0
11	50.0	156.0	12	50.0	106.0
13	50.0	56.0	14	50.0	6.0
15	100.0	288.0	16	100.0	240.0
17	100.0	192.0	18	100.0	144.0
19	100.0	96.0	20	100.0	48.0
21	100.0	0.0	22	150.0	306.0
23	150.0	256.0	24	150.0	206.0
25	0.0	288.0	26	150.0	106.0
27	150.0	56.0	28	150.0	6.0
29	200.0	288.0	30	200.0	240.0
31	200.0	192.0	32	200.0	144.0
33	200.0	96.0	34	200.0	48.0
35	200.0	0.0	36	250.0	306.0
37	250.0	256.0	38	250.0	206.0
39	250.0	156.0	40	250.0	106.0
41	250.0	56.0	42	250.0	6.0
43	300.0	288.0	44	300.0	240.0
45	300.0	192.0	46	300.0	144.0
47	300.0	96.0	48	300.0	48.0
49	300.0	0.0	50	350.0	306.0
51	350.0	256.0	52	350.0	206.0
53	350.0	156.0	54	350.0	106.0
55	350.0	56.0	56	350.0	6.0

Table A.2a プロ-中の給水ヘッド内状態量 (Run-14)

経過時間 sec	入口ヘッド圧力 ata	入口ヘッド Kcal エンタルピ kg	出口ヘッド圧力 ata	出口ヘッド Kcal エンタルピ kg
0.0	150.0	248.0	150.0	248.0
10.0	130.0	248.0	130.0	248.0
27.0	106.5	248.0	106.5	248.0
51.0	82.5	248.0	82.5	248.0
85.0	58.5	248.0	58.5	248.0
120.0	40.0	248.0	40.0	248.0
120.5	1.0	248.0	1.0	248.0
999.9	1.0	248.0	1.0	248.0

Table A.2b プロ-中の給水ヘッド内状態量 (Run-15)

経過時間 sec	入口ヘッド圧力 ata	入口ヘッド Kcal エンタルピ kg	出口ヘッド圧力 ata	出口ヘッド Kcal エンタルピ kg
0.0	153.0	390.0	153.0	390.0
0.1	152.0	390.0	152.0	390.0
18.0	141.0	390.0	141.0	390.0
67.0	35.0	390.0	35.0	390.0
67.1	1.0	390.0	1.0	390.0

Table A.3 水リーク率と水噴出角度との関係

水噴出角度 (°)	25.6	25.6	50	107	167	180	180
水リーク孔径 (mm ϕ)	0	0.54	1	2	3	3.20	33.15
Run-14水リーク率 g/sec	0	23.1	79.1	317	711	809	12.5 $\times 10^3$
Run-15水リーク率 g/sec	0	15.1	51.8	207	466	530	12.5 $\times 10^3$

Table A.4 整数入力データ

番地	変数	内容	単位	備考
1	IDTUB	伝熱管配置 { 非定型配置 = 1 { 正三角型配置 = 2 { 長方形配置 = 3 { 千鳥配置 = 4	-	1
2	NTUB	対象伝熱管本数	-	56
3	IDTML	伝熱管材料 { Cr-Mo材 = 1 { SUS材 = 2	-	1
4	IDSPLR	計算打ち切りリーク率の設定方法 { インプットで指定 = 1 { 計算機内部で計算 = 0	-	1
5	IDSPTM	計算打ち切り時刻指定の有・無 { 有 = 1 { 無 = 0	-	1
6	IDRES	リスタート処理の有・無 { 有 = 1 { 無 = 0	-	0
7	IDPRT	計算結果プリントアウトのタイミング { 等時間間隔 = 1 { 総リーク率変動時 = 2 { 貫通発生時 = 3	-	3
8	NSGW	水側状態量 SWG (I, J) を与える際 の J の変化点数	-	8
9	NSGS	Na側状態量 SGS (I, J) を与える 際 J の変化点数	-	2
10	NLDTM	リーク検出時間 XLDTM (I, J) を 与える際 J の変化点数	-	2
11	IDANGJ	ジェット噴出角度の設定方法 { 噴出角度一定 = 0 { リーク率の関数 = 1	-	1
12	NANGJ	ジェット噴出角度 ANGJ (I, J) を 与える際 J の変化点数	-	8

Table A.4 整数入力データ (続き)

番地	変数	内容	単位	備考
13	IDWREQ	ウェステージ率計算方法 ジェット衝突角度を { 考慮しない=1 { 考慮する =2	-	2
14	IDPNEQ	貫通孔径計算方法 { リーク孔径の関数=1 { 正規分布曲線近似=2	-	1
15	NJET	ジェット噴出角度の等分割数	-	100 (50 or 25)
16	INTLR	大リーク領域でのウェステージ作用無視 { 無視しない =1 { 総リーク率が一定値以上で無視=2 { 1本当りのリーク率が " =3	-	1
17	IPRTSP	ウェステージ点の計算結果を { =0 プリントアウトする。 { =1 プリントアウトしない。	-	0
18	IFRIC	水リーク率計算で圧損, 入熱を { =0 考慮しない。 { =1 考慮する。	-	1
19	IDTCON	タイム・ステップ幅を { =0 入力値(DTINP)一定とする。 { =1 コントロールする。	-	1 (0)
20	TDGAS	カバーガス圧変化の計算を { =0 しない。 { =1 する。	-	0
21	JLP	カバーガス圧変化の計算結果のプリントアウト { =0 プリントアウトしない。 { =N Nステップ毎にプリントアウトする。	-	0

Table A.5 実数入力データ

番地	変数	内容	単位	備考
1	XINTD	初期リーク孔径	mm	0.5 [0.3]
2	XINTA	初期リーク噴出方向	°	281.0
3	OPTM	オペレータ操作時間	sec	0.0
4	WDTM	水側ダンプ時間	sec	120.0
5	TUBD	伝熱管外径	mm	31.8
6	TUBT	伝熱管肉厚	mm	4.18 (3.8 or 3.13)
7	SPLR	計算打ち切りリーク率	g/sec	12.5×10^4
8	SPTM	計算打ち切り時刻	sec	1.0×10^5
9	RESTM	リスター開始希望時刻	sec	—
10	DT	単位計算ステップ当りの時間	sec	1.0 (2 or 5)
11	DTPRT	計算結果プリントアウト時間間隔	sec	—
12	DTDMP	データを外部記憶にダンプする時間間隔	sec	—
13	PSI	オリフィス係数	—	0.65
14	XKAPPA	過熱蒸気の断熱指数	—	1.3
16	A1	自己拡大発生条件計算式の定数 A_1	—	3.5
17	BLRW	小規模水リーク率と中規模水リーク率 のウェステージ計算式の境界を与える 水リーク率	g/sec	10.0
24	TAUC	伝熱管材料 (Cr-Mo) の引張り強さ	kg/mm ²	—
25	TAUS	伝熱管材料 (SUS) の引張り強さ	kg/mm ²	—
26	PENETT	貫通肉厚	mm	0.836 (0.76)
27	TOLRNS	ジェット衝突点決定時の公差	°	30 (5,10,60,90)
28	XJLNG	ジェット長を制限するL/D値	—	150
伝熱管配置が正三角形配置の時のパラメータ (IDTUB=2の時のみ要。)				
1000	TP	ピッチ	mm	—
1001	TD	境界(円)の直径	mm	—
伝熱管配置が長方形配置の時のパラメータ (IDTUB=3の時のみ要。)				
1002	RPX	x軸方向のピッチ	mm	—
1003	RPY	y軸方向のピッチ	mm	—
1004	RDX	境界(長方形)のx軸方向長さ	mm	—
1005	RDY	境界(長方形)のy軸方向長さ	mm	—
伝熱管配置が千鳥配置の時のパラメータ (IDTUB=4の時のみ要。)				
1006	SPX	x軸方向のピッチ	mm	—
1007	SPY	y軸方向のピッチ	mm	—

Table A.5 実数入力データ (続き)

番地	変数	内容	単位	備考	
1008	SDX	境界(長方形)のx軸方向長さ	mm	_____	
1009	SDY	境界(長方形)のy軸方向長さ	mm	_____	
伝熱管配置が非定形配置の時の入力データ (IDTUB=1の時のみ要。)					
1100	TBLTUB(I,J)	伝熱管中心座標 TBLTUB(1, J) = x座標 TBLTUB(2, J) = y座標	mm mm	Table A.1 (Table A.2) 参照	
SG運転条件に関する入力データ					
5100	SGW(I, J)	水側の状態量の時間変化 SGW(1,J)=ダンプ開始後経過時間 SGW(2,J)=入口ヘッダ圧力 SGW(3,J)=入口ヘッダエンタルピ SGW(4,J)=出口ヘッダ圧力 SGW(5,J)=出口ヘッダエンタルピ	sec kg/cm ² kcal/kg kg/cm ² kcal/kg	Table A.2 (a) (Table A.2 (b)) 参照	
5600	SGS(I, J)	Na側の状態量の時間変化 SGW(1,J)=水側ダンプ開始後経過時間 SGW(2,J)=圧力 SGW(3,J)=温度	sec kg/cm ² °C	0.0 1.5 343 { 333 }	2000.0 1.5 343 { 333 }
リーク検出時間に関する入力データ					
5900	XLDTM(I, J)	リーク率に対するリーク検出時間 XLDTM(1,J)=リーク率 XLDTM(2,J)=リーク率 が, XLDTM(1,J)以上, XLDTM(1,J+1)未満 の場合のリーク検出時間	g/sec sec	0 1×10 ¹⁰	1600 { 2500 } 7 { 14.0 }
ジェット噴出角度に関する入力データ					
6100	ANGJ(I, J)	リーク率に対するジェット噴出角度 ANGJ(1,J)=リーク率 ANGJ(2,J)=噴出角度	g/sec °	Table A.3 参照	
6300	WDTM9	水側圧力が8[atg]になるダンプ時間	sec		
6301	PINTLR	ウェステージ作用を無視とする大リーク域の下限リーク率	g/sec	1.25×10 ⁴	
6302	WTBLOW	ブローを開始するためのトータル・リーク率	g	1.25×10 ⁴	

Table A.5 実数入力データ (続き)

番地	変数	内 容	単 位	備 考
6303	DLMX	破損口径の上限値	mm	5.73
6304	CHGLEK	トータル・リーク量の積算下限リーク率	g/sec	0.0
6305	RAMDA	伝熱管の摩擦損失係数	-	0.02
6306	RLIN	入口ヘッダ〜リーク位置長さ	m	14.2
6307	RLOUT	出口ヘッダ〜リーク位置長さ	m	99999.9
6308	HBREAK	リーク位置の初期エンタルピー	kcal/kg	248 (390)
6309	DTGAS	カバーガス圧変化計算のタイムステップ	sec	—————
6310	RATEH2	H ₂ /H ₂ O モル転換化	-	—————
6311	TGAS	カバーガス絶対温度	K	—————
6312	PCG0	カバーガス初期圧力	kg/cm ² a	—————
6313	VCG	カバーガス空間容積	m ³	—————
6314	PRDBST	カバーガス圧による検出圧力値	kg/cm ² a	—————
6315	CV	カバーガスに接続されるガス系ライン の特価CV値	-	—————
6316	PDMPT	ダンプ・タンク圧力	kg/cm ² a	—————
6317	WGMAX	1本の伝熱管よりの水リーク率上限値	g/sec	12.5×10 ⁴

Table A.6 Input Card Image of the Case R14REF

*** CASE R14REF SIMUL. OF SWAT-3 RUN-14 4/3/82 ***						
	1	4	1	56	1	1
	5	4	1	0	3	8
	9	4	2	2	1	7
	13	4	2	1	100	1
	17	4	0	1	1	0
	21	1	0			
*IDEND						
	1	4	.500	281.	0.0	120.
	5	4	31.80	4.18	12.5 E4	1.0 E5
	9	2	0.0	1.0		
	13	4	0.65	1.3		
	16	2	3.5	10.0		
	26	3	0.836	30.0	150.	
	1100	4	200.0	144.0	0.0	240.0
	1104	4	0.0	192.0	0.0	144.0
	1108	4	0.0	96.0	0.0	48.0
	1112	4	0.0	0.0	50.0	306.0
	1116	4	50.0	256.0	50.0	206.0
	1120	4	50.0	156.0	50.0	106.0
	1124	4	50.0	56.0	50.0	6.0
	1128	4	100.0	288.0	100.0	240.0
	1132	4	100.0	192.0	100.0	144.0
	1136	4	100.0	96.0	100.0	48.0
	1140	4	100.0	0.0	150.0	306.0
	1144	4	150.0	256.0	150.0	206.0
	1148	4	150.0	156.0	150.0	106.0
	1152	4	150.0	56.0	150.0	6.0
	1156	4	200.0	288.0	200.0	240.0
	1160	4	200.0	192.0	0.0	288.0
	1164	4	200.0	96.0	200.0	48.0
	1168	4	200.0	0.0	250.0	306.0
	1172	4	250.0	256.0	250.0	206.0
	1176	4	250.0	156.0	250.0	106.0
	1180	4	250.0	56.0	250.0	6.0
	1184	4	300.0	288.0	300.0	240.0
	1188	4	300.0	192.0	300.0	144.0
	1192	4	300.0	96.0	300.0	48.0
	1196	4	300.0	0.0	350.0	306.0
	1200	4	350.0	256.0	350.0	206.0
	1204	4	350.0	156.0	350.0	106.0
	1208	4	350.0	56.0	350.0	6.0
	5100	5	0.0	150.0	248.0	150.0 248.0
	5105	5	10.0	130.0	248.0	130.0 248.0
	5110	5	27.0	106.5	248.0	106.5 248.0
	5115	5	51.0	82.5	248.0	82.5 248.0
	5120	5	85.0	58.5	248.0	58.5 248.0
	5125	5	120.0	40.0	248.0	40.0 248.0
	5130	5	120.5	1.0	248.0	1.0 248.0
	5135	5	999.9	1.0	248.0	1.0 248.0
	5600	3	0.0	1.5	341.0	
	5603	3	2000.0	1.5	341.0	
	5900	4	0.0	1. E10	1600.0	7.0
	6100	4	0.0	25.6	23.1	25.6
	6104	4	79.1	50.0	317.	107.0
	6108	4	711.0	167.0	809.0	180.0
	6112	2	12500.	180.0		
	6300	4	120.5	12.5 E5	12.5 E5	5.73
	6304	5	0.0	0.02	14.2	99999.9 248.0
	6317	1	12.5 E3			
*RDEND						
*DEND						

Table A.7 Input Card Image of the Case R15REF

*** CASE R15REF SIMUL. OF SWAT-3 RUN-15 4/3/82 ***						
	1	4	1	56	1	1
	5	4	1	0	3	5
	9	4	2	2	1	7
	13	4	2	1	100	1
	17	4	0	1	1	0
	21	1	0			
*IDEND						
	1	4	.300	0.	0.0	120.
	5	4	31.80	4.18	12.5 E4	1.0 E5
	9	2	0.0	1.0		
	13	2	0.65	1.3		
	16	2	1.3	10.0		
	26	3	0.836	30.0	150.	
	1100	4	150.0	156.0	0.0	240.0
	1104	4	0.0	192.0	0.0	144.0
	1108	4	0.0	96.0	0.0	48.0
	1112	4	0.0	0.0	50.0	306.0
	1116	4	50.0	256.0	50.0	206.0
	1120	4	50.0	156.0	50.0	106.0
	1124	4	50.0	56.0	50.0	6.0
	1128	4	100.0	288.0	100.0	240.0
	1132	4	100.0	192.0	100.0	144.0
	1136	4	100.0	96.0	100.0	48.0
	1140	4	100.0	0.0	150.0	306.0
	1144	4	150.0	256.0	150.0	206.0
	1148	4	0.0	0.0	150.0	106.0
	1152	4	150.0	56.0	150.0	6.0
	1156	4	200.0	288.0	200.0	240.0
	1160	4	200.0	192.0	200.0	144.0
	1164	4	200.0	96.0	200.0	48.0
	1168	4	200.0	0.0	250.0	306.0
	1172	4	250.0	256.0	250.0	206.0
	1176	4	250.0	156.0	250.0	106.0
	1180	4	250.0	56.0	250.0	6.0
	1184	4	300.0	288.0	300.0	240.0
	1188	4	300.0	192.0	300.0	144.0
	1192	4	300.0	96.0	300.0	48.0
	1196	4	300.0	0.0	350.0	306.0
	1200	4	350.0	256.0	350.0	206.0
	1204	4	350.0	156.0	350.0	106.0
	1208	4	350.0	56.0	350.0	6.0
	5100	5	0.0	153.0	390.0	153.0
	5105	5	0.1	152.0	390.0	152.0
	5110	5	18.0	141.0	390.0	141.0
	5115	5	67.0	35.0	390.0	35.0
	5120	5	67.1	1.0	390.0	1.0
	5600	3	0.0	1.5	333.0	
	5603	3	2000.0	1.5	333.0	
	5900	4	0.0	1. E10	2500.0	14.0
	6100	4	0.0	25.6	15.1	25.6
	6104	4	51.8	50.0	207.0	107.0
	6108	4	466.0	167.0	530.0	180.0
	6112	2	12500.0	180.0		
	6300	4	67.1	12.5 E5	12.5 E5	8.50
	6304	5	0.0	0.02	14.2	99999.9
	6317	1	12.5 E3			390.0
*RDEND						
*DEND						