

JAERI-M

7 3 8 2

PWR-FLECHT実験データによる  
再冠水解析コード(REFLA-1D)の検証

1977年12月

村尾良夫・南雲宏一\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

PWR - FLECHT 実験データによる再冠水解析コード  
(REFLA - 1 D) の検証

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

村尾 良夫・南雲 宏一\*

(1977年10月21日受理)

PWR - FLECHT 実験ならびに FLECHT 热伝達相関式を用いて再冠水解析コード REFLA - 1 D の検証を行った。

冠水速度  $25 \sim 2.5 \text{ cm/sec}$ , 系圧力  $4 \text{ kg/cm}^2$  の再冠水現象については実験結果との一致は良かった。

中央部のクエンチ時刻は、上記の条件では士 20 % の誤差範囲内であった。

低圧力、低サブクール度の実験結果と計算結果との一致は悪かった。低い位置でのクエンチ速度に関する一致は悪かった。

今後改良すべき点としては、①クエンチフロントが低い時期の液温の計算、②遷移流領域のモデルの改良の 2 項目が見い出された。

---

\* 三菱原子力工業（株）

Examination of the Reflood Analysis Code  
( REFLA-1D ) by PWR-FLECHT Data

Yoshio MURAO, Hiroichi NAGUMO\*

Division of Reactor Safety, Tokai Research  
Establishment, JAERI

( Received October 21 , 1977 )

Performance of the reflood analysis code REFLA-1D for studying the reactor safety during LOCA was examined with PWR-FLECHT experimental data and FLECHT heat transfer correlation.

In the reflood phenomena under conditions of flooding velocity 25-2.5 cm/sec and system pressure 4 kg/cm<sup>2</sup>a, agreement is good between experiment and calculation.

Quench time at the midplane of a heater rod under the above conditions predicted within  $\pm 20\%$  of error.

In low pressure and in low subcooling test, agreement is not good. And, agreement is not good either in quench velocity at the low elevation.

The following were indicated as necessary:

- 1) calculation of the liquid temperature when the quench front is low, and (2) improvement of the model in the transition flow region.

Keyword : Reactor Safety, LOCA, Reflood,  
Numerical Calculation, Heat Transfer,  
REFLA-1D Code,  
Code Performance

---

\* Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. REFLA - 1 D コードと PWR - FLECHT 実験の概要 .....	2
2.1 REFLA - 1 D コード .....	2
2.2 PWR - FLECHT 実験の概要 .....	10
2.3 FLECHT 熱伝達相関式 .....	13
3. REFLA - 1 D コードによる計算結果と PWR - FLECHT データとの比較 .....	17
3.1 全般的傾向 .....	17
3.2 クエンチ時刻, 温度の比較 .....	28
3.3 熱伝達率の比較 .....	39
4. ま と め .....	56

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	REFLA-1D Code and Outline of PWR-FLECHT Experiment .....	2
2.1	REFLA-1D Code .....	2
2.2	Outline of PWR-FLECHT Experiment .....	10
2.3	FLECHT Heat Transfer Correlation .....	13
3.	Comparison of Results Calculated by REFLA-1D Code with PWR-FLECHT Data .....	17
3.1	General Tendency .....	17
3.2	Comparison between Calculated and Measured Quench Time and Quench Temperature .....	28
3.3	Comparison between Calculated and Measured Heat Transfer Coefficient .....	39
4.	Summary .....	56

## 1. 序 論

軽水炉の冷却材喪失事故時には、破断部よりの冷却材の放出により炉心部の冷却は不十分になり、炉心の温度上昇が生じる。

炉心燃料は、過熱するが、緊急冷却系からの冷却材が炉心に注入され、徐々に炉心は冠水される。この過程を再冠水過程と呼んでいる。

再冠水過程は、高温の炉心燃料に水が付着しにくいくことと、燃料体冷却時に、炉心過熱期間に蓄積された熱と崩壊熱を主とする発熱による蒸気発生ならびに蒸気と水との干渉とのため、比較的複雑な熱水力現象を呈している。

原研における再冠水研究の開始前に、米国では、PWR - FLECHT 実験が行われ、再冠水時の熱水力現象に関する実験式が作られ、安全解析に用いられてきた。

これらの実験式は、現在の PWR の形状に対しては、使用できることが実証されているが、現象の物理的把握に基いていないので、実験条件をはずれた領域に適用することはできない。

原研における再冠水研究計画は、現象の物理的把握に基く再冠水解析コード (REFLA コード) システムの開発を目的として、実験・解析と並行して行われてきた。

このコードシステムの基本をなすものが、一定流量注水時の炉心内の熱水力現象を一次元的に解析するための計算コード、REFLA - 1 D、である。

本計算コード、REFLA - 1 D、は著者の一人が、原研における研究成果等に基いて、西ドイツにおいて開発し<sup>(1)</sup>、その後、改良を進めてきたものである。<sup>(2), (3)</sup>

本報告の目的は、PWR - FLECHT 実験結果、FLECHT 相関式と REFLA - 1 D コードの計算結果を比較し、計算コードの問題点を明らかにすることである。

以下に、REFLA - 1 D コードの概要、PWR - FLECHT 実験の概要<sup>(4), (5)</sup>、FLECT 相関式<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>についても説明し、更に、PWR - FLECHT 実験、FLECHT 相関式と REFLA - 1 D の計算結果について比較・検討を行う。

## 2. REFLA - 1 D コードと PWR - FLECHT 実験の概要

### 2.1 REFLA - 1 D コード<sup>(1), (2), (3)</sup>

PWR - FLECHT 実験において観測された流動パターン、原研における外観加熱石英管内再冠水モデル実験で観測された流動パターンに基いて、Fig. 2.1 のような二種の流動パターンが採用された。

Type 1は、クエンチフロントでの液体の温度が飽和温度より低い場合に生じ、クエンチフロント下流での蒸気発生が、伝熱面近傍のみであり、しかも、サブクール状態のため、蒸気は凝縮し、下流に向っての蒸気量の増加は、ほとんどない領域が存在する。この領域は、液柱状の水塊があり、いわゆるサブクール膜沸騰領域である。

更に下流では、液体の温度は飽和になり、蒸気の発生は増加するが、蒸気の流速が低いため、液体を液滴として飛散させることは出来ず、液体が淀んだ領域を形成する。この領域を遷移流領域と名付ける。

遷移流領域の下流では、蒸気の流速は増し、液滴を飛散させることが出来るようになる。この領域を液滴分散流領域と名付ける。

液体が完全に蒸発した場合は、過熱蒸気流領域となる。

壁温の低い部分では、液滴は壁に付着できるようになる。この部分を液滴再付着領域と名付ける。

クエンチフロントの上流は、液体単相又は、サブクール膜沸騰領域である。

Type 2は、クエンチフロント上流で液体の温度が飽和になり、飽和二相流領域が存在する場合であり、クエンチフロントは、一種のドライアウト点と考えられる。クエンチフロント下流には、遷移流領域、液滴分散流領域、過熱蒸気流領域、液滴再付着領域が存在する。

Type 1は、入口サブクール度大、冠水速度大又は注水開始初期に現われ、Type 2は、入口サブクール度小、冠水速度小又は注水後十分に時間が経過した時刻に現われるものと考えられる。

このような流動モデルに対して、領域の境界を決定するために、Table 2.1 の関係を用いていく。

各領域には、Table 2.2 に示す熱伝達相関式と Table 2.3 に示す水力学的関係又はモデルを用いている。

Table 2.2 に軸方向燃料体温度分布の時間変化の計算結果の一例を示す。

実験開始時のステップ状燃料温度分布から徐々に下方がクエンチし、最終的には、上部で液滴再付着が生じ、500 秒の少し後に、燃料体全体がクエンチを完了することがわかる。

Fig. 2.3 に境界点の移動を示している。先ず、蒸気の発生とともに実液位が上昇し、その後、クエンチフロント、遷移沸騰が徐々に上昇する。

なお、REFLA - 1 D の計算においては、計算定数を次のように定めた。

JAERI-M 7382

ノード数：91

時間ステップ<sup>°</sup>：0.05 秒

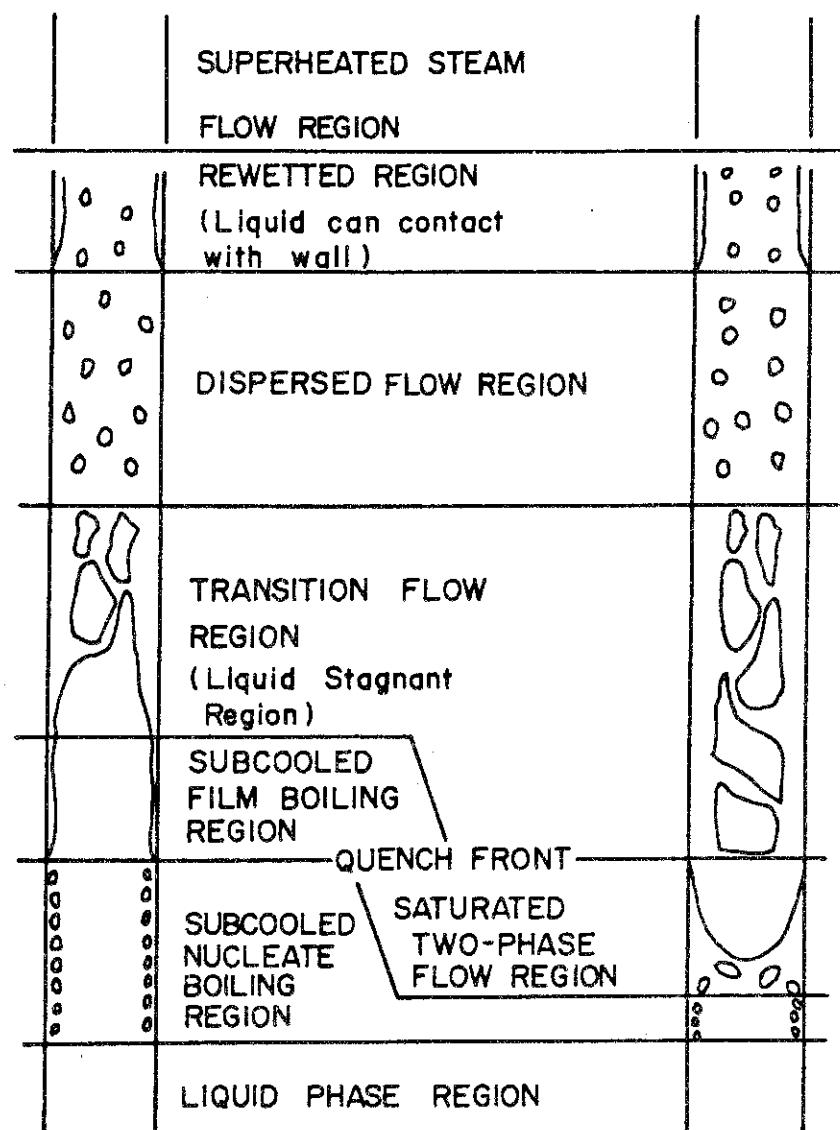
臨界ウェーバー数 (We critical) : 1.0

(記号)

$T_l$  : 液体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_m$  : 液体最高過熱温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_R$  : 液滴再付着温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_w$  : 壁温 ( $^{\circ}\text{C}$ ) (ただし、(1)式では、見かけのクエンチ温度)  
 $T_{\text{sat}}$  : 饱和温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $U$  : クエンチ速度 ( $\text{m}/\text{h}$ )  
 $\rho$  : 密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $C_p$  : 比熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}$ ) ((1)式では、伝熱面)  
 $\Delta T_{\text{sub}}$  : サブクーリング ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\lambda$  : 热伝導率 ( $\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$ )  
 $\rho$  : 質量 ( $\text{kg}\text{h}^2/\text{m}^4$ )  
 $P$  : 系圧力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2\text{a}$ )  
 $We$  : ウェーバ数 (-)  
 $We_{\text{critical}}$  : 臨界ウェーバ数 (-)  
 $Nu$  : ヌッセルト数 (-)  
 $Re$  : レイノルズ数 (-)  
 $Pr$  : プラントル数 (-)  
 $De$  : 等価直径 (m)  
 $Z$  : 入口からの距離 (m)  
 $\phi_B$  : 沸騰熱流束 ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ )  
 $h$  : 热伝達率 ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ )  
 $h_{\text{sat}}$  : 饱和膜沸騰热伝達 ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ )  
 $H_{fg}$  : 蒸発潜熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}$ )  
 $g$  : 重力加速度 ( $\text{m}/\text{h}^2$ )  
 $\mu_g$  : 蒸気の粘性係数 ( $\text{kg}\text{h}/\text{m}^2$ )  
 $L$  : 代表長さ (m)  
 $\sigma$  : 表面張力

(添字)

$\text{min}$  : 最小値  
 $\text{max}$  : 最大値  
 $g$  : 蒸気  
 $L$  : 液体  
 $W$  : 伝熱面



$T_L$  : Liquid Temperature  
 $T_{SAT}$  : Saturation Temperature

Fig. 2.1 Two types of the flow pattern during reflood phase

Table 2.1 Boundary Conditions used in REFLA-1D

BOUNDARY CONDITION

\*QUENCH FRONT

HEAT CONDUCTION CONTROLLED QUENCH

$$U^{-1} = \frac{\rho C_p (T_w - T_m)}{2.19 \times 10^6 (1 + 0.2778 \times 10^{-4} \Delta T_{sub})^3} \text{ (kcal/m}^2\text{h}) \quad (1)$$

DROPLET REWETTED QUENCH

$$T_R = T_m + K(T_m - T_1)$$

$$K = (\lambda_L \rho_L C_p L)^{1/2} / (\lambda_W \rho_W C_p W)^{1/2} \quad (2)$$

$$T_m = 321.05 + 0.237p \text{ (kg/cm}^2\text{a)}$$

\*CARRY-OVER BOUNDARY (TRANSITION/DISPersed FLOW)

$$We \geq We_{critical} \quad (3)$$

FORCE BALANCE BETWEEN STEAM FLOW AND DROPLETS

Table 2.3 Hydrodynamic Model used in REFLA-1D

HYDRODYNAMICS

\*LIQUID PHASE/SUBCOOLED BOILING/SUBCOOLED F.B.

----- SINGLE LIQUID PHASE FLOW

\*BULK BOILING/TRANSITION FLOW

----- TWO-PHASE CORRELATION WITH LOCKHART-MARTINELLI'S X<sub>TT</sub>

\*DISPersed FLOW

----- SLIP VELOCITY=TERMINAL FREE FALL VELOCITY OF DROPLETS

\*SUPERHEATED STEAM FLOW

----- SINGLE GAS PHASE FLOW

Table 2.2 Heat Transfer Correlations used in REFLA-1D

SINGLE PHASE FLOW (LIQUID/GAS)\*TURBULENT FLOW ( $Re > 2400.0$ )

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (\text{Dittus-Boelter}) \quad (4)$$

\*LAMINAR FLOW ( $Re < 2400.0$ )

$$Nu = 1.077 (Re Pr De / Z)^{1/3} \quad (\text{Hausen}) \quad (5)$$

$Nu_{\min} = 3.65$

NUCLEATE BOILING

$$O_B = 2.197 (T_w - T_{sat})^4 \exp(1.54 * 10^{-6} p) \quad (\text{Jens \& Lottes}) \quad (6)$$

$$O_{B\max} = 3.43 * 10^6 (1 + 0.2778 * 10^{-4} \Delta T_{sub}^3) \quad (7)$$

FILM BOILING (SUBCOOLED F.B./TRANSITION FLOW)

$$h = h_{sat} (1.0 + 0.025 \Delta T_{sub}) \quad (\text{SUDO et al})$$

$$h_{sat} = 0.62 \left[ \frac{\lambda g \rho_L (\rho_L - \rho_g) H_{fg}}{L \mu g (T_w - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (\text{MODIFIED BROMLEY}) \quad (9)$$

$$L = 2\pi (\sigma / g (\rho_L - \rho_g))^{1/2} \quad (10)$$

Wall to Liquid by Radiation

DISPERSED FLOW

Two-Step Model

- Wall to Steam by Convection
  - Steam to Droplets by Convection
  - Wall to Droplets by Radiation
- (11)

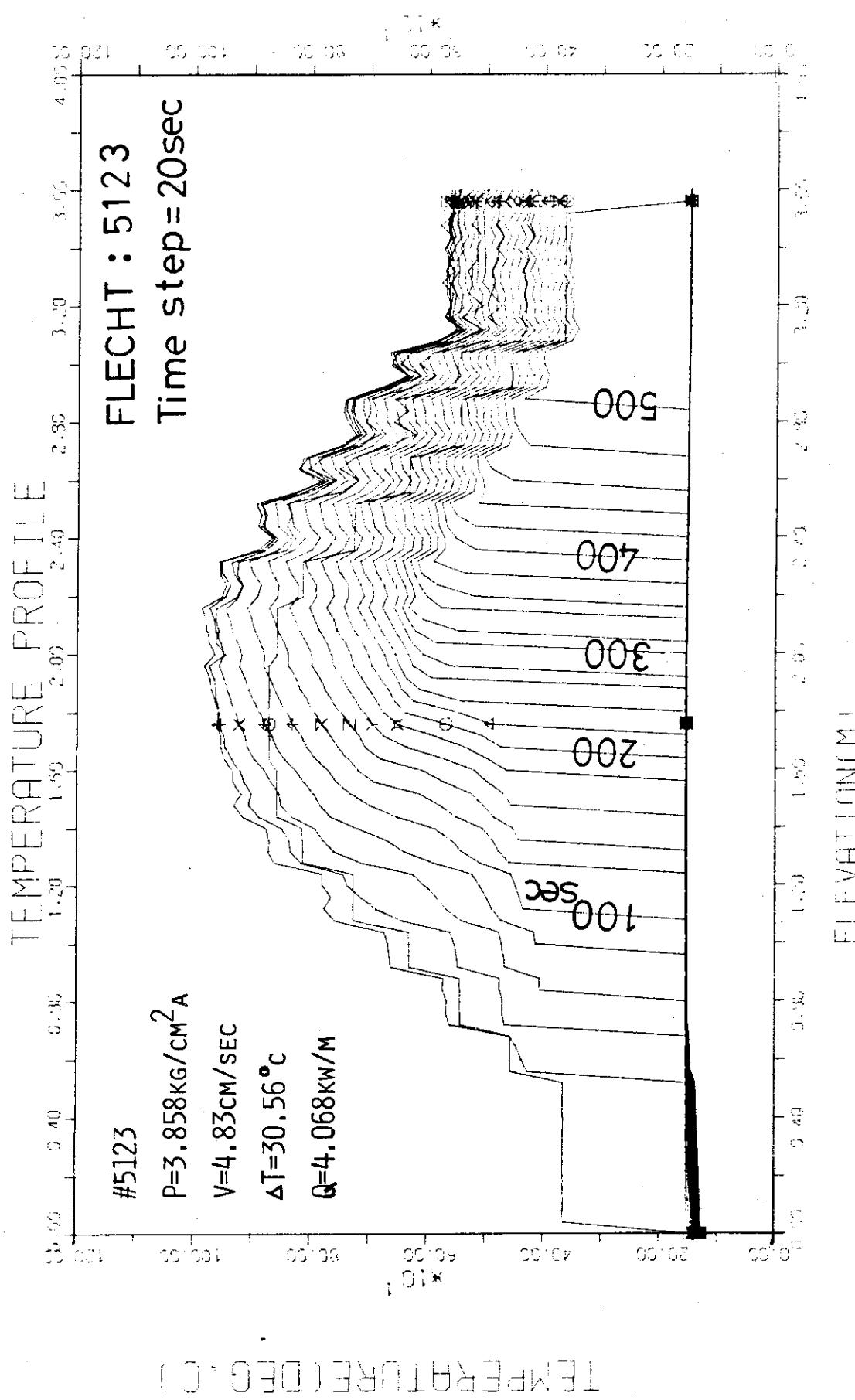


Fig. 2.2 A example of calculated results on temperature profile

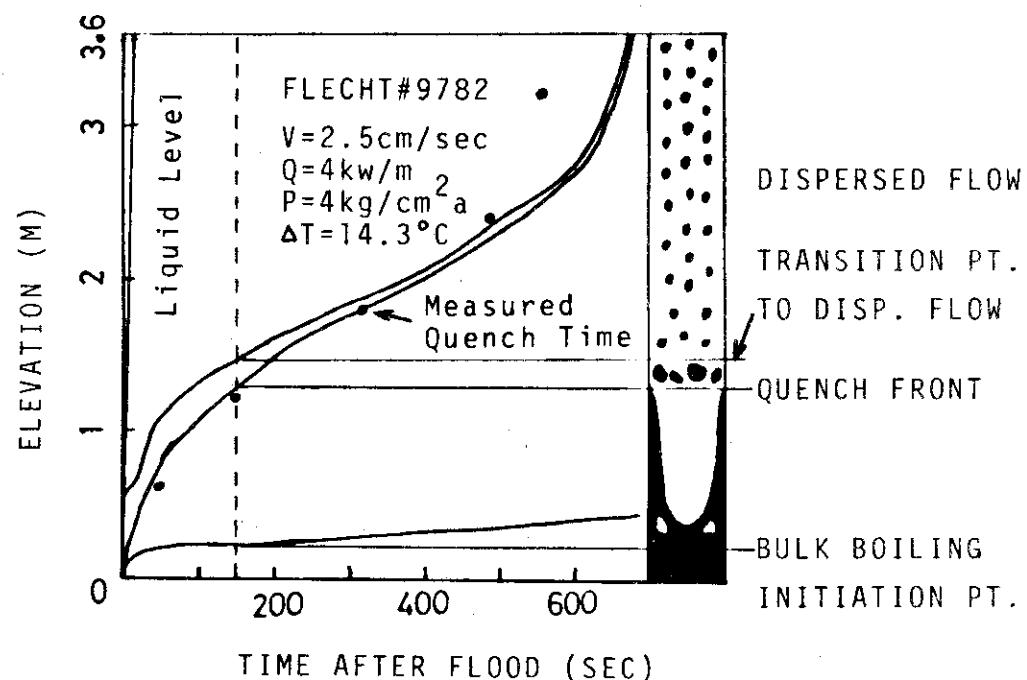


Fig. 2.3 A example of calculated results on boundary progress

## 2.2 PWR - FLECHT 実験の概要<sup>(4), (5)</sup>

米国ウェスティングハウス社のFLECHT実験装置は、ガス圧による注水系、テスト部、テスト部上部の気水分離器を兼ねた上部プレナム、テスト上部から出るキャリオーバ水ホールドタンク、蒸気供給用蒸気発生器から成る。

テスト部は17.8 mm厚炭素鋼製の四角形チャンネル（設計圧力  $6.8 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ 、設計温度  $426.7^\circ\text{C}$ ）内に  $7 \times 7$  本バンドルまたは、 $10 \times 10$  本バンドルを収容している。

$10 \times 10$  本バンドル用四角形チャンネルには3個の石英窓がある。上部プレナムにも石英観測窓がある。

バンドルは、発熱ピンと非発熱の制御棒シングル、計装棒より構成され、上、下端を含め8個のエッグクレート型スペーサグリッドで支持されている。

発熱ピンは、Fig. 2.4に示すように間接加熱であり、発熱長さは、3.6 mである。被覆管内面に  $1.0 \phi$  クロメル-アルメル熱電対（ステンレスシース、非接地型）を最高5本取付けてある。

この発熱ピンは、軸方向に正弦状発熱とするため8段階のステップ状近似の発熱が行われ、発熱は、SCR制御により崩壊熱模擬が行われている。

テストの手順は、次に述べるとおりである。すなわち、(1)蓄水器に、イオン交換器を通した水を満し、実験系圧力 + 500 psi に加圧され、外巻ヒータで加熱する。(2)少量の水がテスト部加熱部直下まで入れられる。(3)四角形チャンネルはバンドルに短時間電流を通し加熱される。チャンネルは、一部予熱ヒータで加熱される。チャンネルが希望した温度に達した後で、蒸気発生器からの蒸気で加圧される。水の排出、予熱ヒータにより蓄水器からテスト部までの配管、チャンネルの温度を注入水の設定温度とする。(4)注水開始とともにテスト部へ供給される電力は、崩壊熱曲線に沿って自動的に減少する。

REFLA-1Dの計算においては、次のようにFLECHT実験を模擬した。

### (1) 崩壊熱曲線

$$\text{A型: } Q_t = Q_0 \times \{ 0.4518 \exp(-0.0283t) + 0.5482 - 4.922 \times 10^{-4}t \}$$

$$\text{B型: } Q_t = Q_0 \times \{ 0.4200 \exp(-0.0283t) + 0.5800 - 3.920 \times 10^{-4}t \}$$

$$\text{D型: } Q_t = Q_0 \times \{ 0.3400 \exp(-0.01733t) + 0.6600 - 3.400 \times 10^{-4}t \}$$

### (2) 軸方向出力分布

$$Q(z,t) = Q_t \times P(z)$$

$$\text{IF } (Z > 1.80) \quad Z = 3.60 - Z$$

$$0 \leq Z < 0.54 \quad P(Z) = 0.306$$

$$0.54 \leq Z < 0.72 \quad P(Z) = 0.43$$

$$0.72 \leq Z < 0.90 \quad P(Z) = 0.55$$

$$0.90 \leq Z < 1.08 \quad P(Z) = 0.67$$

$$1.08 \leq Z < 1.26 \quad P(Z) = 0.80$$

$$1.26 \leq Z < 1.44 \quad P(Z) = 0.92$$

$$1.44 \leq Z < 1.62 \quad P(Z) = 0.98$$

$$1.62 \leq Z < 1.80 \quad P(Z) = 1.00$$

## (3) 発熱体初期温度

140 °C (軸方向に均一)

上記軸方向出力分布で加熱し、中央が設定温度になった時刻から、注水を開始し、出力を崩壊熱曲線に沿って減少させる。

## (4) 発熱体

形状：直径 10.7 mm

長さ 3.6 m

配列ピッチ 14.3 mm

物性：密度 2000.0 kg/m³

比熱 0.41318 kcal/kg °C

## (記号)

 $Q_0$  : 初期ピーク出力 $Q_t$  :  $t$  (秒) 後のピーク出力 $Q(z,t)$  :  $t$  (秒) 後の加熱部下端から  $Z$  (m) の位置の出力 $P(z)$  : 中央で規格化した軸方向出力分布形 $t$  : 注水開始後の時間 (秒) $Z$  : 加熱部下端からの距離 (m)

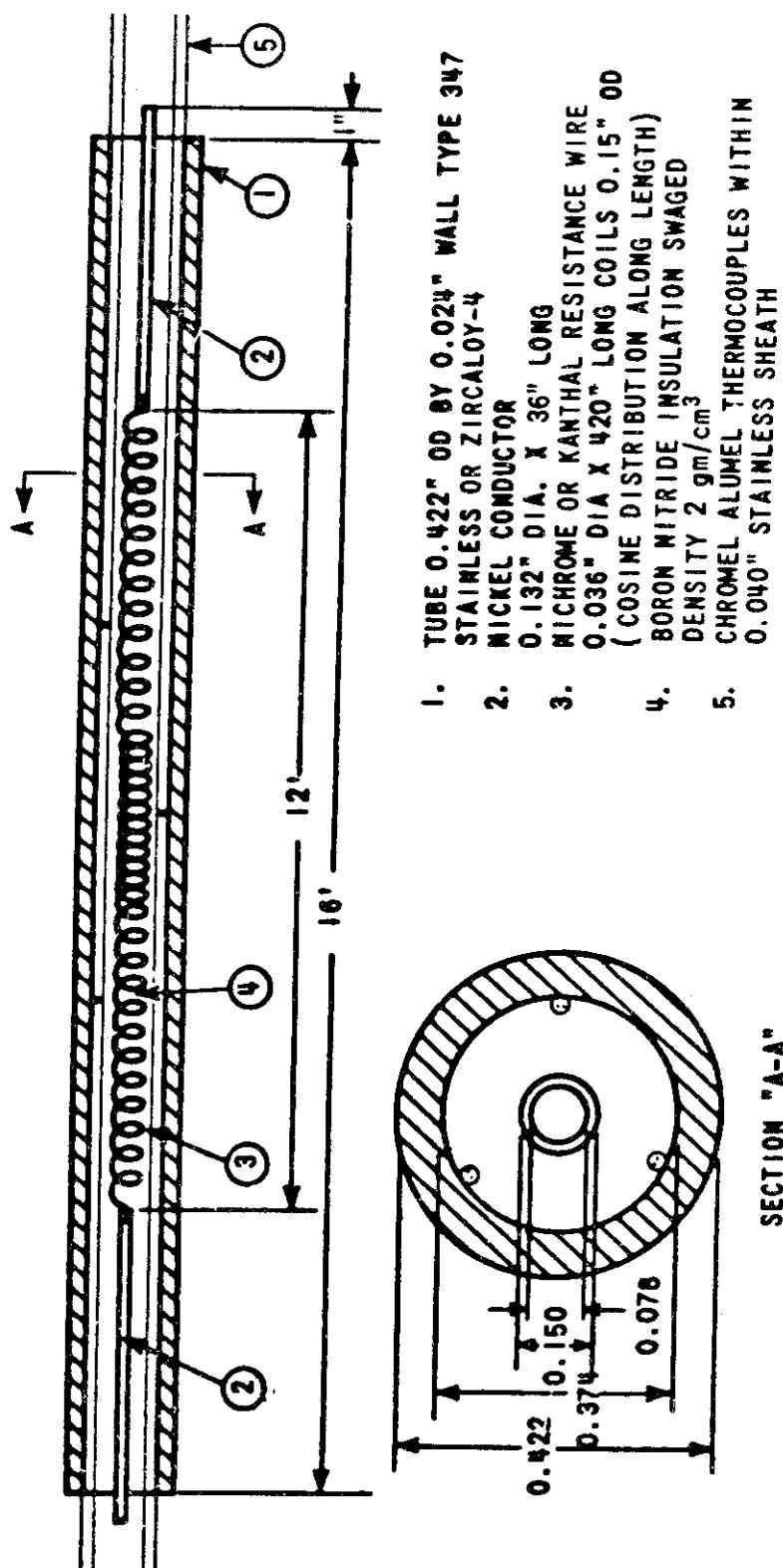


Fig. 2.4 FLECHT heater rod schematic design  
(Referred from Ref. (6))

### 2.3 FLECHT 热伝達相関式

FLECHT 一定再冠水速度実験<sup>(4), (5), (6)</sup>をベースとして、開発された FLECHT 热伝達相関式<sup>(5)</sup>は Fig. 2.5 に示されているようにクエンチまでの過程を 6 フィート位置のクエンチ時刻で規格化した無次元時間を用いて、三つの区間に分けてそれぞれの区間に適用できる 3 つの式からなっている。

各区間は、それぞれ異った Flow regime に対応しており、Period I は、steam and dispersed flow regime・Period II は、Transition flow regime・Period III は film boiling に対応している。

FLECHT 热伝達相関式の適用範囲を下に示す。

#### 相関式適用範囲

再冠水速度 (V <sub>in</sub> )	0.4 - 10 in/sec
系圧力 (P)	15 - 90 psia
入口サブクール度 ( $\Delta T_{sub}$ )	16 - 189°F
初期被覆管最高温度 (T <sub>init</sub> )	1200 - 2200°F
初期最高出力密度 (Q' <sub>max</sub> )	0.69 - 1.40 kw/ft
エレベーション (Z)	4 - 8 ft
流路閉塞パーセント (B)	0 - 75 %

上に記した様に FLECHT 热伝達相関式の適用エレベーションは 4 ~ 8 ft であるが、REFLA-1D との比較のため、参考として、2 ft, 10 ft エレベーションでの热伝達係数も図に示してある。

また 6 ft エレベーション以外の位置のクエンチ時刻は、FLECHT 相関式では示されていないので、FLECHT 相関式伝達係数のグラフでの 6 ft 以外のクエンチ時刻は実験から得られたクエンチ時刻を使用し、6 ft 位置では、FLECHT 6 ft クエンチ時刻相関式の値を使用している。

以下に FLECHT 热伝達相関式を示す。

6 feet quench time

$$t_{q6ft} = 98.39 [e^{-0.0107\Delta T_{sub}} (1-e^{-0.667V_{in}}) (1+0.5e^{-0.000037P^3}) + 1.3e^{-0.111V_{in}^2} + 17.3e^{-0.000037P^3} e^{-0.49V_{in}^2} (1.207Q_{max}^{1.5} - 0.667) + (3.28/V_{in}^{1.1} - 2.8e^{-V_{in}}) (1+0.5e^{-0.000037P^3})] (1+0.0000588T_{init})$$

Period I       $0 < (t/t_{q6ft}) < (t/t_{q6ft})_2$

$$h = h_1 [1 - e^{-10(X_2 - X)/X_2}] + [h_{12} - h_1 \{1 - e^{-10(X_2 - X)/X_2}\}]$$

$$[1 - e^{-X} - 0.9X_e^{-X^2}] [1 - 2.21e^{-0.4V_{in}ue^{-u}} \exp\{-(0.588Z - 3.824)^2\}]$$

 $t$  = time after flood (seconds)

$$h_1 = 3.67 Q'_{max} [1 - \exp\{-(T_{init} - 700)/435\}]$$

$$(t/t_{q6ft})_2 = 0.62 [(1 - e^{-0.192Z}) - 0.115Ze^{-0.0368Z^2}]$$

$$X_2 = 17.6 [1 + 4.37e^{-0.0166\Delta T_{sub}}] [1 - \exp\{-(0.00075$$

$$+ 0.0000272(V_{in}-8)^2(T_{init}-650)\}] (t/t_{q6ft})_2$$

$$X = 17.6 [1 + 4.37e^{-0.0166\Delta T_{sub}}] [1 - \exp\{-(0.00075$$

$$+ 0.0000272(V_{in}-8)^2(T_{init}-650)\}] (t/t_{q6ft})$$

$$u = 9(t/t_{q6ft})^2 / (t/t_{q6ft})_2^2$$

$$h_{12} = 4 + [35.7 + (22 - 0.00303Z^{4.1}) (1 - e^{-0.0333P})$$

$$- 0.034Pe^{-0.0011P^2})] [1 - e^{-0.2V_{in}}]$$

$$+ 8[1 - e^{-2V_{in}}] [1 - e^{-B/25}]$$

Period II       $(t/t_{q6ft})_2 < t/t_{q6ft} < (t/t_{q6ft})_3$

$$h = h_2 + b_1[y^2 + b_2(y^2 - b_3y^3) + b_4y^2e^{-6.38y}]$$

$$(t/t_{q6ft})_3 = 1.55[(1-e^{-0.205Z}) - 0.154Ze^{-0.0421Z^2}]$$

$$h_2 = h_{12}[(1-e^{-X_2}) - 0.9X_2e^{-X_2^2}]$$

$$b_1 = [682 - 650(1-e^{4-Z})][1 - \exp\{-0.95(1-0.0488Z)V_{in}\}]$$

$$[1 - \exp\{-0.0238\Delta T_{sub}\}][0.696 + 0.304e^{-B/25}]$$

$$y = (t/t_{q6ft}) - (t/t_{q6ft})_2$$

$$b_2 = 0.4Z[1 - e^{-2(Z-3.5)}][1.33(1-e^{-0.0227P}) - 1]$$

$$-2.9[1 - e^{-V_{in}/2.5}][1 - e^{-B/25}]$$

$$b_3 = 2.55[Z-3.7]^2 e^{3.7-Z}$$

$$b_4 = 8.75V_{in} e^{(-V_{in}^2)} \exp(-0.036\Delta T_{sub})$$

Period III       $(t/t_{q6ft}) > (t/t_{q6ft})_3$

$$h = h_3 + C[(t/t_{q6ft}) - (t/t_{q6ft})_3]$$

$$h_3 = h_2 + b_1 [y_3^2 + b_2(y_3^2 - b_3y_3^3) + b_4y_3^2 e^{-6.38y_3}]$$

$$C = 420 [1 - e^{-0.00625b_1}]$$

$$y_3 = (t/t_{q6ft})_3 - (t/t_{q6ft})_2$$

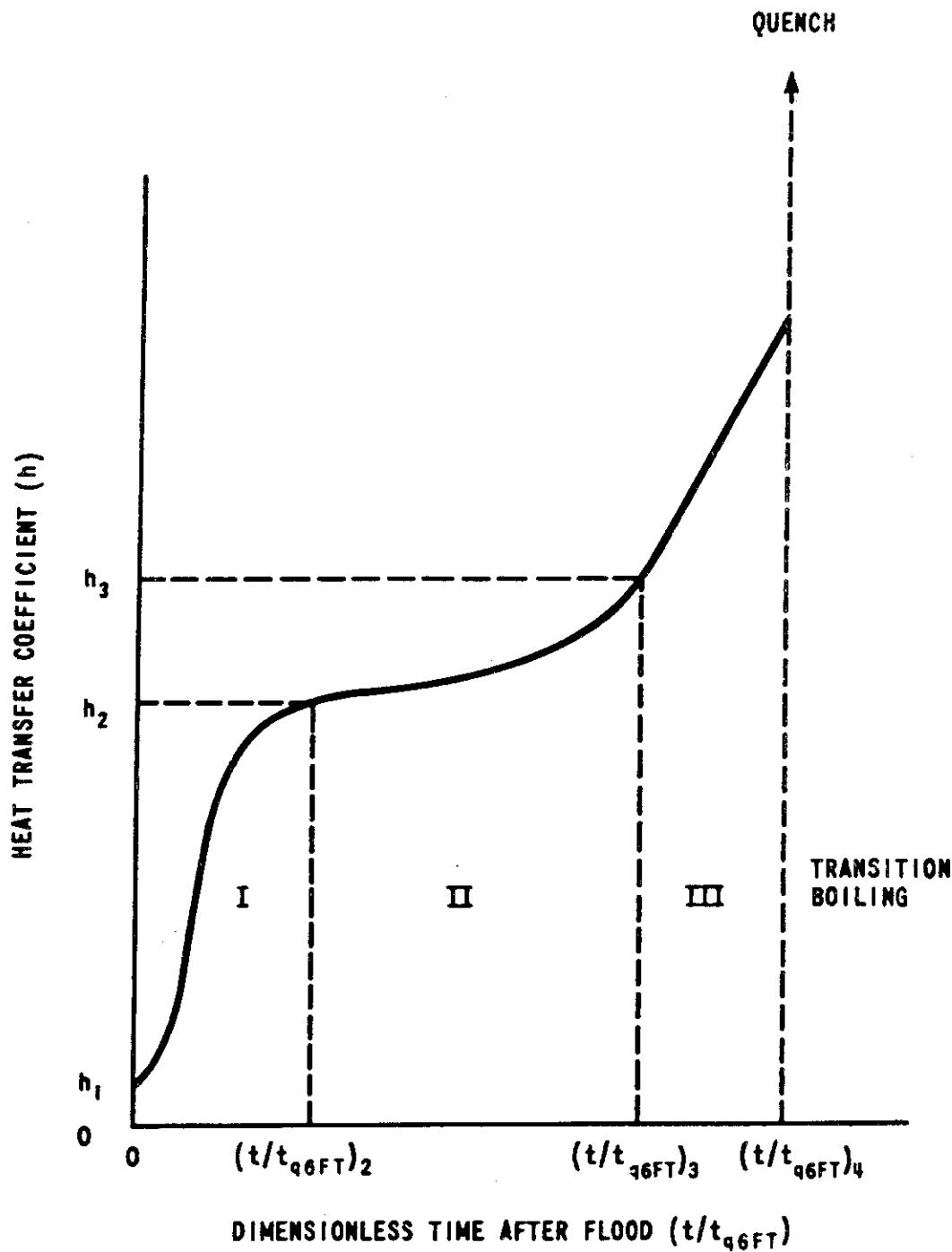


Fig. 2.5 Schematic diagram of FLECHT heat transfer coefficient versus dimensionless time  
(Referred from Ref.(6))

### 3. REFLA - 1 D コードによる計算結果と PWR - FLECHT データとの比較

#### 3.1 全般的傾向

炉心中央部の熱伝達率について、冠水速度をパラメータとして示したのが Fig. 3.1 である。実線は計算結果、点線はほぼ同じ条件で行われた PWR - FLECHT 実験のデータである。

冠水速度  $25 \sim 2.5 \text{ cm/sec}$  の計算は、崩壊熱曲線が B 型であり、 $2.0 \sim 1.5 \text{ cm/sec}$  のものは、A 型として行った。

熱伝達率が約  $220 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  の時間に対して平坦な部分は、遷移流領域において仮定した飽和膜沸騰相関式によるもので、実験データに比べて多少異っている。しかし、全般的には、傾向は一致している。

熱伝達率が約  $220 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  から急増する時刻がクエンチ時刻である。冠水速度  $25 \sim 4.8 \text{ cm/sec}$  では、実験と計算とのクエンチ時刻の一致はよく、 $2.5 \text{ cm/sec}$  の場合でも、 $20\%$  の誤差範囲内で一致しているが、 $2.0 \sim 1.5 \text{ cm/sec}$  の場合は、あまりよい一致を示さない。

よって、冠水速度  $2.5 \text{ cm/sec}$  より低い場合には、本計算コードの予測値の信頼性は少ないと考えられる。

高い冠水速度でのクエンチ時刻の予測は良好であることがわかっているので、 $5.1 \sim 2.5 \text{ cm/sec}$  の冠水速度で  $1.4 \sim 4.0 \text{ kg/cm}^2\text{a}$  の圧力の場合の 4, 6, 8 フィートのクエンチ時刻について、PWR - FLECHT データと計算とを比較したのが Fig. 3.2 である。

●印の印の  $1.4 \text{ kg/cm}^2\text{a}$  の圧力、 $2.5 \text{ cm/sec}$  の冠水速度の場合を除いて  $\pm 20\%$  の誤差範囲内で 4, 6, 8 フィートでのクエンチ時刻は予測できることがわかり、●印のデータも、ほぼ満足できるデータであることがわかる。

Fig. 3.3 は、クエンチフロントが時刻とともにどのように進行するかを示したもので、実線は計算値、点線は実測値である。 $15.0 \sim 2.5 \text{ cm/sec}$  の冠水速度内で、クエンチフロントの進行については、10 フィートの位置を除き、傾向は、実測値と計算結果との間でかなり近いことがわかる。

次に、より詳しく PWR - FLECHT データとの比較を行う。FLECHT Group I Test Report と FLECHT Final Report Supplement に記載されているいくつかの実験について、同じ条件で計算を行った。

初期被覆管最高温度は  $1600^\circ\text{F}$  付近に固定して、他のパラメータは、実験の大部分をカバーしている。

計算を行った実験の実験番号、パラメータを Table 3.1 に示す。

各実験についての主要なパラメータについて実験と計算との比較を Table 3.2 ~ 3.16 に示す。

一般に発熱体温度は、初期に軸方向に  $140^\circ\text{C}$  均一とし、与えられた軸方向出力分布の下で、中央の温度が指定した温度になると冠水開始としたが、結果をみると 2 フィート、4 フィートの初期温度が実験と大きく異っている ( $50^\circ\text{C}$  以上) 場合があったので、これらの実験例については、2, 4 フィート位置の初期温度が実験値に Best Fit するように、初期温度を調整し、再計算を行った。

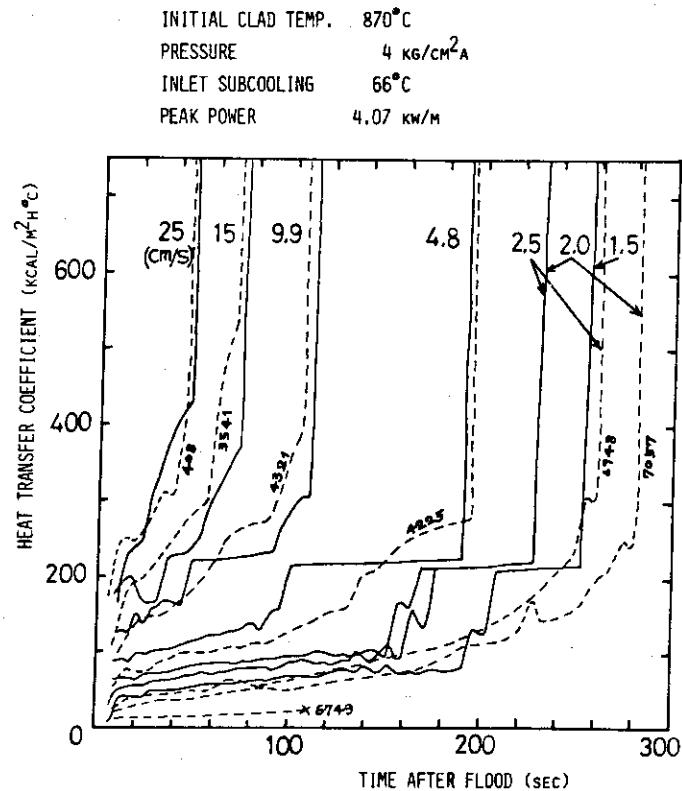


Fig. 3.1 REFLA-1D and FLECHT midplane heat transfer coefficients

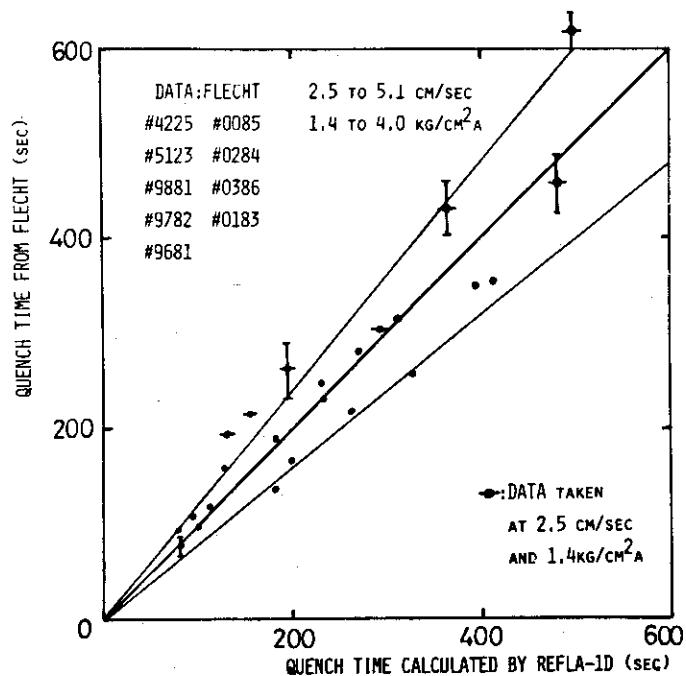


Fig. 3.2 Comparison of calculated and measured quench time

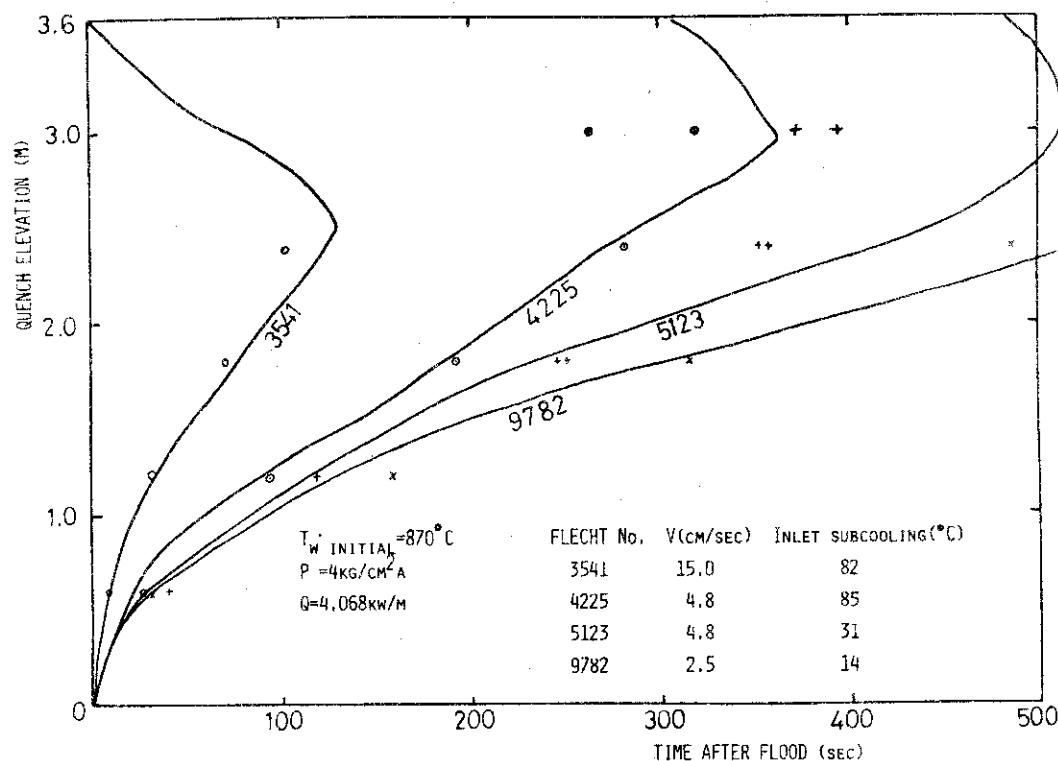


Fig. 3.3 Comparison of calculated and measured quench behavior

Table 3.1 FLECHT experiment parameters

Para- meter Number	$V_{in}$ (in/sec)	P(psia)	$T_{init}$ ( $^\circ\text{F}$ )	$\Delta T_{sub}$ ( $^\circ\text{F}$ )	$Q'_{maxfD}$ (kw/ft)	Decay Power Type
9782	1.0	56.0	1590	28	1.24	B
0284	1.0	21.0	1590	48	1.24	B
0085	2.0	25.0	1600	138	1.24	B
9681	2.0	61.0	1586	144	1.24	B
2322	4.0	15.0	1612	137	1.24	A
3541	5.9	57.0	1598	141	1.24	B
5231	5.9	18.0	1603	53	1.24	B
0487	0.8	18.0	1582	35	1.24	B
9983	1.0	19.0	1586	137	1.24	B
0690	0.6	15.0	1600	22	0.69	D
0386	1.0	20.0	1595	39	0.69	B
1720	5.9	61.0	1617	25	1.24	A
4027	1.9	57.0	1592	141	0.69	B
4526	5.9	57.0	1608	139	0.69	B
0711	5.9	15.0	1600	137	1.24	A

Table 3.2 Comparison of experiment and analysis

Run 9782

$P=56$  psia,  $V_{in}=1.0$  in/sec,  $T_{init}=1590$  °F  
 $\Delta T_{sub}=28$  °F,  $Q'_{max}=1.24$  kw/ft

Eleva-tion	REFLA1D	Initial Temp.	Max. Temp.	Temp. Rise	Turn around Time	Quench Temp.	Quench Time	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
	FLECHT	(°C)	(°C)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	
2 ft	REFLA1D	451	469	18	4	412	30	
	FLECHT	525*	543*	18*	4*	388*	46*	
4 ft	REFLA1D	717	808	91	32	451	122	
	FLECHT	747*	840*	93*	38*	441*	136	
6 ft	REFLA1D	765	894	129	46	437	159	
	FLECHT	860	1046	186	54	580	296	
8 ft	REFLA1D	867*	1067*	200*	56*	578*	306*	
	FLECHT	866	1139	274	91	491	323	327
10 ft	REFLA1D	713	1001	284	98	517*	514*	
	FLECHT	747*	1027*	280*	96*	422	487	
	REFLA1D	481	954	473	228	326	552	
	FLECHT	451	825	374	156			
	REFLA1D	525*	862*	337*	144*			
	FLECHT	504*	930*	426*	244*			

\* Reanalysis with initial temperature fitting.

Table 3.3 Comparison of experiment and analysis

Run 0284

$P=21$  psia,  $V_{in}=1.0$  in/sec,  $T_{init}=1590$  °F  
 $\Delta T_{sub}=48$  °F,  $Q'_{max} = 1.24$  kw/ft

Eleva-tion	REFLA1D	Initial Temp.	Max. Temp.	Temp. Rise	Turn around Time	Quench Temp.	Quench Time	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
	FLECHT	(°C)	(°C)	(°C)	(sec)	(°C)	(sec)	
2 ft	REFLA1D	452	506	54	20	436	44	
	FLECHT	504*	527*	23*	10*	444*	52*	
4 ft	REFLA1D	500	542	42	14	373	88	
	FLECHT	721	894	173	60	539	180	
6 ft	REFLA1D	738*	916*	178*	62*	533*	194*	
	FLECHT	752	935	183	46	453	260	
8 ft	REFLA1D	866	1195	329	102	633	456	
	FLECHT	866*	1207*	341*	106*	631*	466*	
10 ft	REFLA1D	866	1218	352	144	412	614	643
	FLECHT	721	1135	414	182			
	REFLA1D	739*	1151*	412*	180*	541*	712*	
	FLECHT	755	1116	361	189	437	924	
	REFLA1D	452	813	361	116			
	FLECHT	504*	930*	426*	244*			
	REFLA1D	506	838	332	206	323	1056	
	FLECHT							

Table 3.4 Comparison of experiment and analysis

Run 0085

$$P=25 \text{ psia}, V_{in}=2.0 \text{ in/sec}, T_{init}=1600^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T_{sub}=138^{\circ}\text{F}, Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$$

Eleva-tion	REFLA1D	Initial	Max.	Temp.	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
	FLECHT	Temp. (°C)	Temp. (°C)	Rise (°C)				
2 ft	REFLA1D	454	489	35	10	487	14	
		500*	526*	26*	10*	508	18	
	FLECHT	494	521	27	9	454	33	
4 ft	REFLA1D	725	829	104	20	488	96	
		741*	830*	89*	22*	489*	96*	
	FLECHT	760	854	94	26	458	118	
6 ft	REFLA1D	872	1056	184	40	461	234	
		871*	1039*	168*	42*	460*	236*	
	FLECHT	863	1031	168	57	459	231	222
8 ft	REFLA1D	725	936	211	70	535	398	
		741*	935*	194*	72*	530*	400*	
	FLECHT	738	922	184	84	444	350	
10 ft	REFLA1D	455	689	234	88	654	210	
		500*	704*	204	86*			
	FLECHT	509	631	122	78	293	430	

Table 3.5 Comparison of experiment and analysis

Run 9681

$$P=61 \text{ psia}, V_{in}=2.0 \text{ in/sec}, T_{init}=1586^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T_{sub}=1.44^{\circ}\text{F}, Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$$

Eleva-tion	REFLA1D	Initial	Max.	Temp.	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
	FLECHT	Temp. (°C)	Temp. (°C)	Rise (°C)				
2 ft	REFLA1D	454	492	38	10	492	14	
		518*	537*	19*	6*	504*	16*	
	FLECHT	513	570	57	9	420	30	
4 ft	REFLA1D	720	811	91	12	452	82	
		742*	798*	56*	12*	461*	82*	
	FLECHT	758	834	76	16	516	76	
6 ft	REFLA1D	864	1004	140	16	414	182	
		864*	962*	98*	20*	413*	182*	
	FLECHT	863	993	130	40	469	147	155
8 ft	REFLA1D	720	876	156	36	431	262	
		742*	866*	124*	38*	437*	260*	
	FLECHT	728	903	175	65	482	217	
10 ft	REFLA1D	454	644	190	66	397	352	
		518*	669*	151*	58*	397*	352*	
	FLECHT	516	658	142	75	349	258	

Table 3.6 Comparison of experiment and analysis

Run 2322

$$P=15.0 \text{ psia}, V_{in}=4.0 \text{ in/sec}, T_{init}=1612^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T_{sub}=137^{\circ}\text{F}, Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	457	470	13	6	470	8	
		526*	540*	14*	8*	530*	14*	
	FLECHT	528	539	11	5	471	22	
4 ft	REFLA1D	731	786	55	10	561	48	
		755*	788*	33*	14*	565*	54*	
	FLECHT	748	802	54	19	515	87	
6 ft	REFLA1D	878	997	119	28	481	136	141
		879*	976*	97*	32*	479*	140*	
	FLECHT	878	971	93	43	482	185	
8 ft	REFLA1D	731	868	137	58	415	250	
		755*	860*	105*	68*	416*	252*	
	FLECHT	768	797	29	8	339	283	
10 ft	REFLA1D	457	601	144	86	587	138	
		526*	623*	97*	90*	399*	308*	
	FLECHT	433	456	23	12	401	189	

Table 3.7 Comparison of experiment and analysis

Run 3541

$$P=57 \text{ psia}, V_{in}=5.9 \text{ in/sec}, T_{init}=1598^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T_{sub}=141^{\circ}\text{F}, Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	456	464	8	4	464	6	
	FLECHT	461	476	15	4	456	10	
4 ft	REFLA1D	725	753	28	4	537	30	
	FLECHT	739	774	35	8	487	34	
6 ft	REFLA1D	870	917	47	6	448	74	73
	FLECHT	870	920	50	8	400	71	
8 ft	REFLA1D	725	770	45	8	371	122	
	FLECHT	756	797	41	8	344	103	
10 ft	REFLA1D	456	510	54	22	457	86	
	FLECHT	454	486	32	12			

Table 3.8 Comparison of experiment and analysis

Run 5231                     $P=18 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=5.9 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1603 \text{ }^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=53 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D FLECHT	455 460	466 477	11 17	2 5	410 454	26 15	
4 ft	REFLA1D FLECHT	726 749	759 791	33 42	6 6	434 428	108 52	
6 ft	REFLA1D FLECHT	873 873	967 926	94 53	18 11	459 284	236 170	155
8 ft	REFLA1D FLECHT	726 756	818 794	92 38	34 9	559	340	
10 ft	REFLA1D FLECHT	455 500	547 516	92 16	56 7	523	102	

Table 3.9 Comparison of experiment and analysis

Run 0487                     $P=18 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=0.8 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1582 \text{ }^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=35 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D 513* FLECHT	450 513* 507	513 555* 558	63* 42 51	22 16* 16	442 491 377	48 64* 105	
4 ft	REFLA1D 740* FLECHT	717 740* 770	941 965* 958	224 225* 188	88 80* 64	607 594* 428	212 230* 352	
6 ft	REFLA1D 861* FLECHT	861 861*	1281 1297*	420 436*	128 136*	644 642*	516 530*	834
8 ft	REFLA1D 739* FLECHT	717 739*	1246 1261*	529 522*	228* 224	552* 408	784* 1200	
10 ft	REFLA1D 513* FLECHT	450 506	980 942	530 436	290 306*			
					269	390	1373	

Table 3.10 Comparison of experiment and analysis

Run 9983

$P=19.0 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=1.0 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1586 \text{ }^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=137 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	451	515	64	18	475	32	
		497*	550*	53*	16*	486*	36*	
	FLECHT	490	538	48	15	375	70	
4 ft	REFLA1D	719	918	199	60	481	158	
		735*	923*	188*	56*	481*	162*	
	FLECHT	757	919	162	50	341	229	
6 ft	REFLA1D	864	1208	344	86	649	376	
		864*	1204*	340*	88*	649*	378*	466
	FLECHT	863	1234	371	146	583	424	
8 ft	REFLA1D	719	1131	412	156			
		735*	1138*	403*	154*	568*	646	
	FLECHT	732	1159	427	191	454	742	
10 ft	REFLA1D	451	875	424	264			
		497*	891*	394*	244*			
	FLECHT	515	853	338	191			

Table 3.11 Comparison of experiment and analysis

Run 0690

$P=15 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=0.6 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1600 \text{ }^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=22 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=0.69 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	454	491	36	28	432	46	
	FLECHT	467	512	45	45	334	129	
4 ft	REFLA1D	725	831	106	64	531	178	
	FLECHT	718	862	144	94	383	356	
6 ft	REFLA1D	871	1102	231	110	619	440	
	FLECHT	856	1159	303	173	372	692	665
8 ft	REFLA1D	725	1042	317	206			
	FLECHT	733	1121	388	232	293	1050	
10 ft	REFLA1D	454	828	374	312			
	FLECHT	479	883	404	433			

Table 3.12 Comparison of experiment and analysis

Run 0386                     $P=20 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=1.0 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1595^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=39^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=0.69 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	453	469	16	22	418	36	
		466*	481*	15*	20*	414*	38*	
	FLECHT	468	491	23	12	328	76	
4 ft	REFLA1D	723	761	38	24	442	124	
		728*	767*	39*	28*	445*	126*	
	FLECHT	742	803	61	67	319	194	
6 ft	REFLA1D	869	945	76	48	532	270	
		869*	948*	79*	48*	531*	272*	341
	FLECHT	866	988	122	77	454	323	
8 ft	REFLA1D	723	839	116	92	489	458	
		728*	843	115*	92*	490*	462*	
	FLECHT	752	906	154	119	342	441	
10 ft	REFLA1D	453	636	183	114			
		466*	642*	176*	108*	389	570	
	FLECHT	491	548	57	118	432	414	

Table 3.13 Comparison of experiment and analysis

Run 1720                     $P=61 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=5.9 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1617^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=25^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=1.24 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	533	544	11	2	383	40	
	FLECHT	522	529	7	3	358	32	
4 ft	REFLA1D	759	782	23	6	404	108	
	FLECHT	758	784	26	5	333	97	
6 ft	REFLA1D	881	918	37	6	428	198	
	FLECHT	881	910	29	7	423	165	132
8 ft	REFLA1D	759	790	31	8	480	320	
	FLECHT	692	724	32	7	348	205	
10 ft	REFLA1D	458	488	30	32	409	206	
	FLECHT	408	426	18	6	206	60	

Table 3.14 Comparison of experiment and analysis

Run 4027       $P=57 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=1.9 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1592^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=141^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=0.69 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D	Initial Temp.	Max. Temp.	Temp. Rise	Turn around Time (sec)	Quench Temp.	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
	FLECHT	(°C)	(°C)	(°C)				
2 ft	REFLA1D	454	473	19	12	473	14	
	FLECHT	436	452	17	8	368	27	
4 ft	REFLA1D	722	765	43	12	452	58	
	FLECHT	731	764	34	12	412	72	
6 ft	REFLA1D	867	940	73	14	386	116	
	FLECHT	867	924	57	28	378	130	130
8 ft	REFLA1D	722	798	76	14	341	156	
	FLECHT	758	830	72	34	319	174	
10 ft	REFLA1D	454	541	87	46	355	176	
	FLECHT	478	569	91	59	313	173	

Table 3.15 Comparison of experiment and analysis

Run 4526       $P=57 \text{ psia}$ ,  $V_{in}=5.9 \text{ in/sec}$ ,  $T_{init}=1608^{\circ}\text{F}$   
 $\Delta T_{sub}=139^{\circ}\text{F}$ ,  $Q'_{max}=0.69 \text{ kw/ft}$

Eleva-tion	REFLA1D	Initial Temp.	Max. Temp.	Temp. Rise	Turn around Time (sec)	Quench Temp.	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
	FLECHT	(°C)	(°C)	(°C)				
2 ft	REFLA1D	458	459	1	2	458	6	
	FLECHT	419	425	6	3	389	9	
4 ft	REFLA1D	730	740	10	4	546	24	
	FLECHT	733	742	8	3	402	32	
6 ft	REFLA1D	876	903	27	6	447	54	
	FLECHT	876	890	14	5	454	54	50
8 ft	REFLA1D	730	759	29	6	384	76	
	FLECHT	742	757	15	6	389	75	
10 ft	REFLA1D	458	483	25	6	371	68	
	FLECHT	433	446	13	7	289	79	

Table 3.16 Comparison of experiment and analysis

Run 0711

$P=15$  psia,  $V_{in}=5.9$  in/sec,  $T_{init}=1600$  °F  
 $\Delta T_{sub}=137$  °F,  $Q'_{max}=1.24$  kw/ft

Eleva-tion	REFLA1D FLECHT	Initial Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Temp. Rise (°C)	Turn around Time (sec)	Quench Temp. (°C)	Quench Time (sec)	FLECHT Correlation Quench Time (sec)
2 ft	REFLA1D	473	477	4	4	474	8	
	FLECHT	479	484	5	3	434	17	
4 ft	REFLA1D	732	735	3	8	549	36	
	FLECHT	714	748	34	10	524	55	
6 ft	REFLA1D	872	916	44	18	490	88	
	FLECHT	871	917	46	15	500	104	107
8 ft	REFLA1D	732	796	64	40	405	154	
	FLECHT	759	777	18	6	394	151	
10 ft	REFLA1D	473	518	45	28			
	FLECHT	387	406	19	7	183	41	

### 3.2 クエンチ時刻、温度の比較

解析した実験例を圧力の高い実験例（60 psia 附近）と低い実験例（50～20 psia）について各熱電対位置のクエンチ時刻について実験と計算との比較を Fig. 3.4～3.11 に示す。

又、入口サブクール度の高い実験例（130°F 以上）と低い実験例（50°F 以下）に分けて比較したもの Fig. 3.12～3.19 に示す。

これらの図から REFLA-1D の解析結果の一般的傾向として次の事が言える。

- (1) 圧力の高い実験例と低い実験例に分けてクエンチ時刻の比較を行うと REFLA-1D は圧力の高い実験例に対して良好な一致を示す。
- (2) 入口サブクール度の高い実験例と低い実験例とに分けて比較すると REFLA-1D はサブクール度の大きい実験例に対して良好な一致を示す。
- (3) クエンチ時刻の一致の良くない実験例では一般的に REFLA-1D の方が実験よりも早いクエンチ時刻を示す。
- (4) 各熱電対位置について比較すると 2 フィート、4 フィート等の低い位置よりは、6 フィート、8 フィートの高い位置のクエンチ時刻の一致が良好である。

参考のため 6 フィート位置のクエンチ時刻の FLECHT 実験と FLECHT 相関式の比較を Fig. 3.20 に示す。当然の事であるが解析した全ての実験例について良好な一致を示している。

クエンチ時刻の良い実験例と悪い実験例とに分けてクエンチ温度を比較したものを Fig. 3.21～3.22 に示す。

図からわかるようにクエンチ時刻の一致の良い実験例は、悪い実験例よりクエンチ温度の一致も良いことがわかる。

このことは、炉心内の熱伝達をより正しく評価でき炉心内温度が正しく計算されれば、現在のクエンチモデルを組合せて、クエンチ現象もより良く予測できることを示している。

8 フィート位置程度まではクエンチは下方から進行してくるので全体の過渡特性も実験結果と合せるためには低い位置から実験に合せて行く必要がある。

実験データの得られている最低の位置は 2 フィートであるので、2 フィートの結果について検討する。

前述のように低い位置では REFLA-1D が一般に早いクエンチを示しているが、クエンチ温度を比較すると次の事がわかる。すなわち、2 フィートでのクエンチが実験よりも早い実験例ではほとんど全てクエンチ温度も実験より高い。その差が 100°C 以上の場合もある。（例外は Run 9782 のみであるが、これは実験との一致の良い実験例である。）

REFLA-1D では、被覆管表面温度が高いにもかかわらず 2 フィート位置までは、実験よりクエンチ速度が速いと言える。

現在のクエンチモデルは、Table 2.1 の(1)式に示すように局所サブクール度が同じ場合被覆管表面温度が高い程、クエンチ速度が遅い特性を持っている。計算結果が上記のようになるためには、局所サブクール度が実験より計算が大であることが考えられる。これは、実験装置の特性上注水初期の液温が高くなるか又は、液温の計算部分に問題があるかどうかの理由によるものと考えられる。

今後検討を加えて行く必要がある。

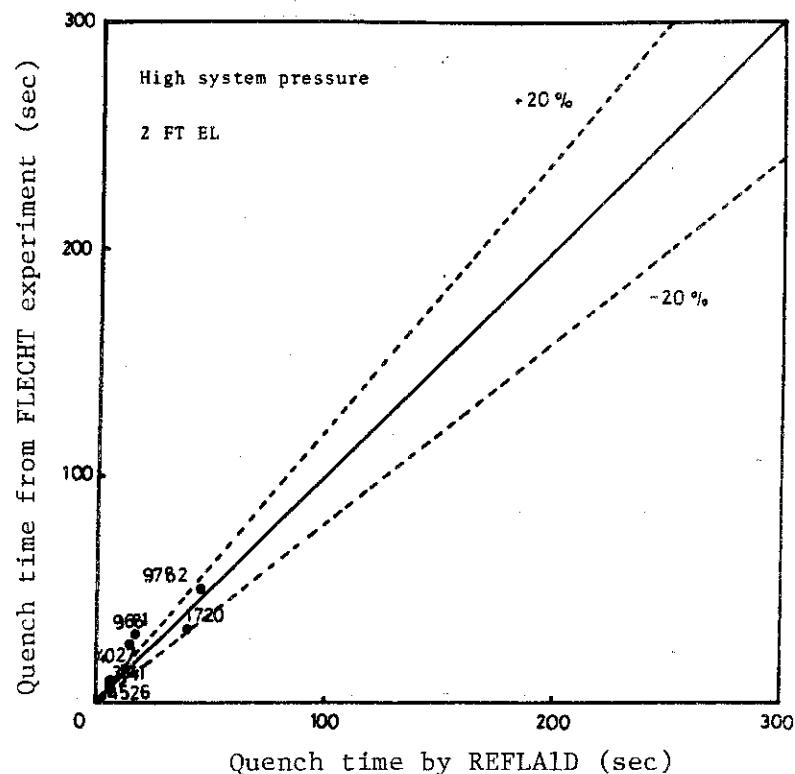


Fig. 3.4 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

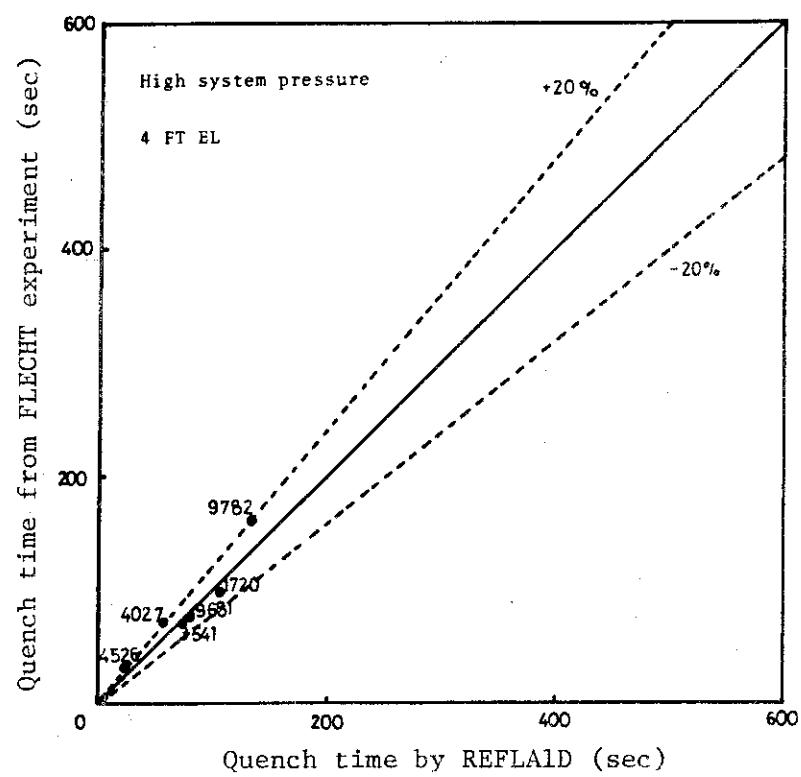


Fig. 3.5 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

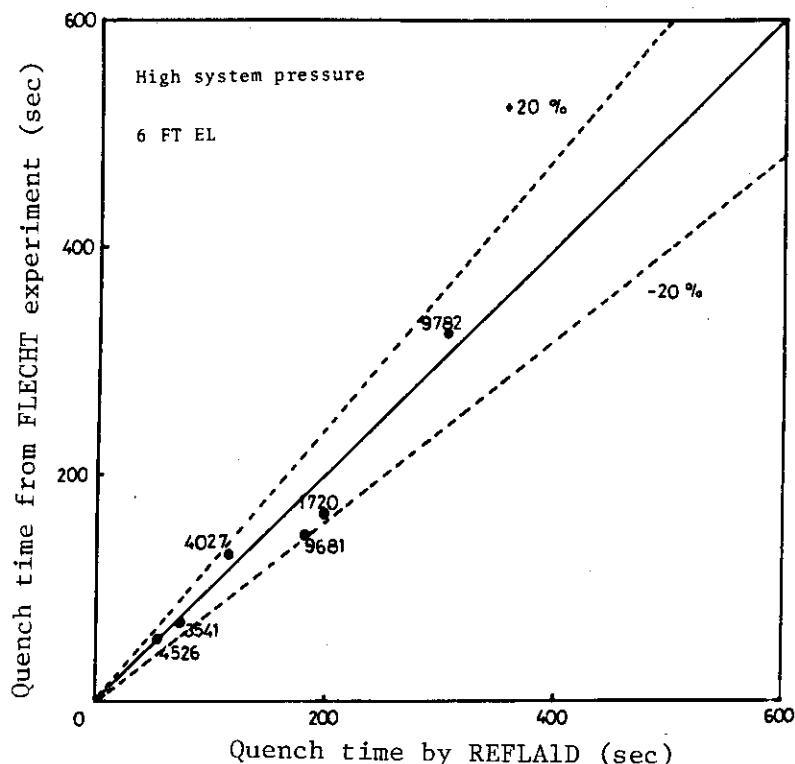


Fig. 3.6 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

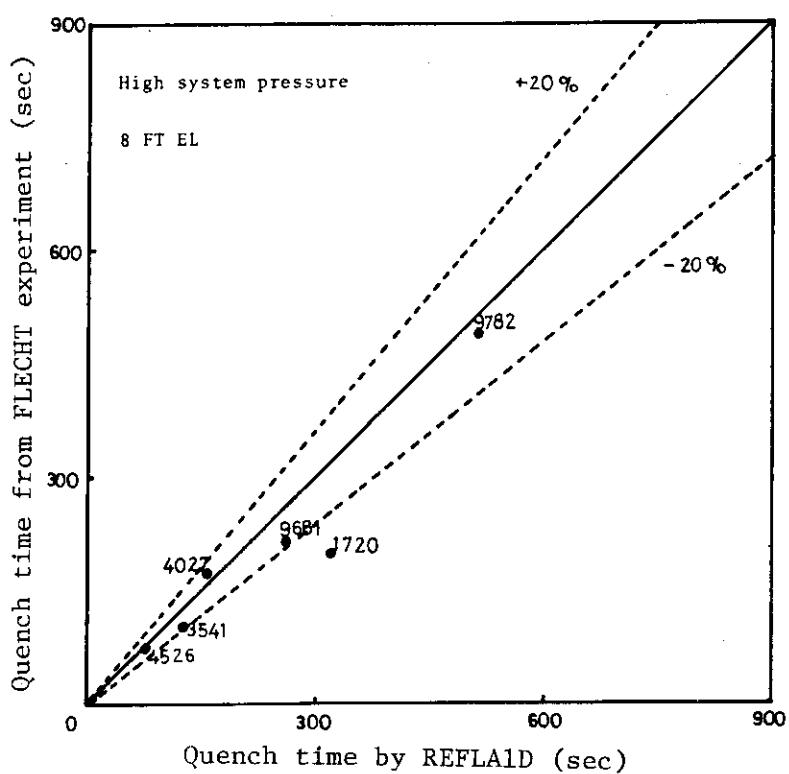


Fig. 3.7 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

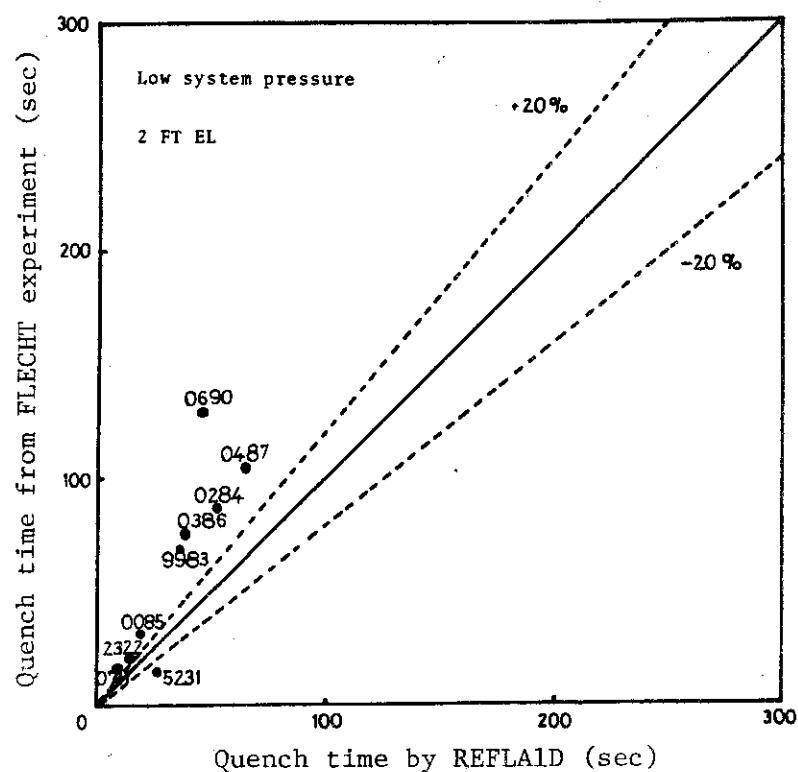


Fig. 3.8 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

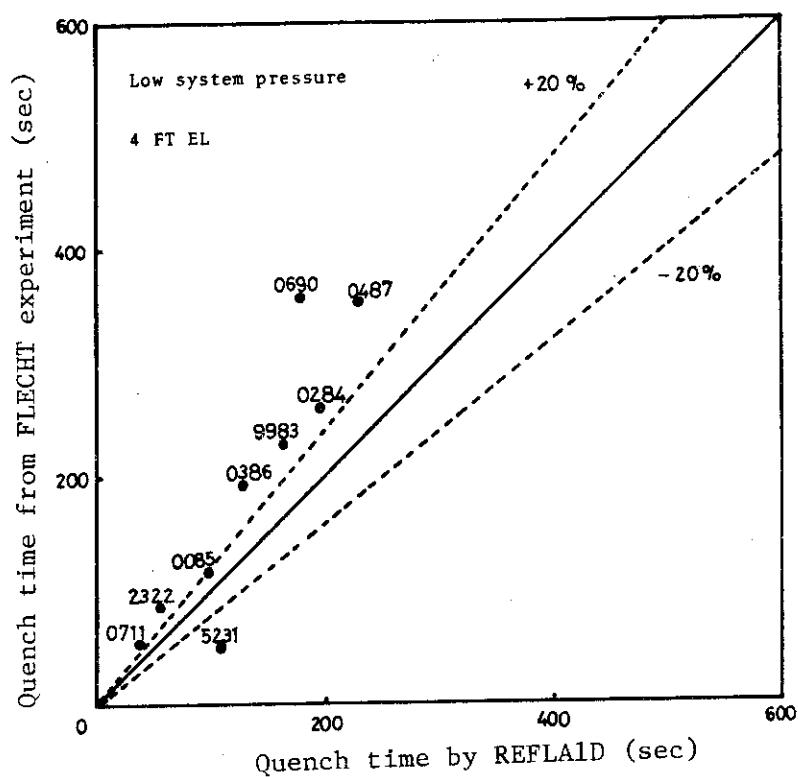


Fig. 3.9 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

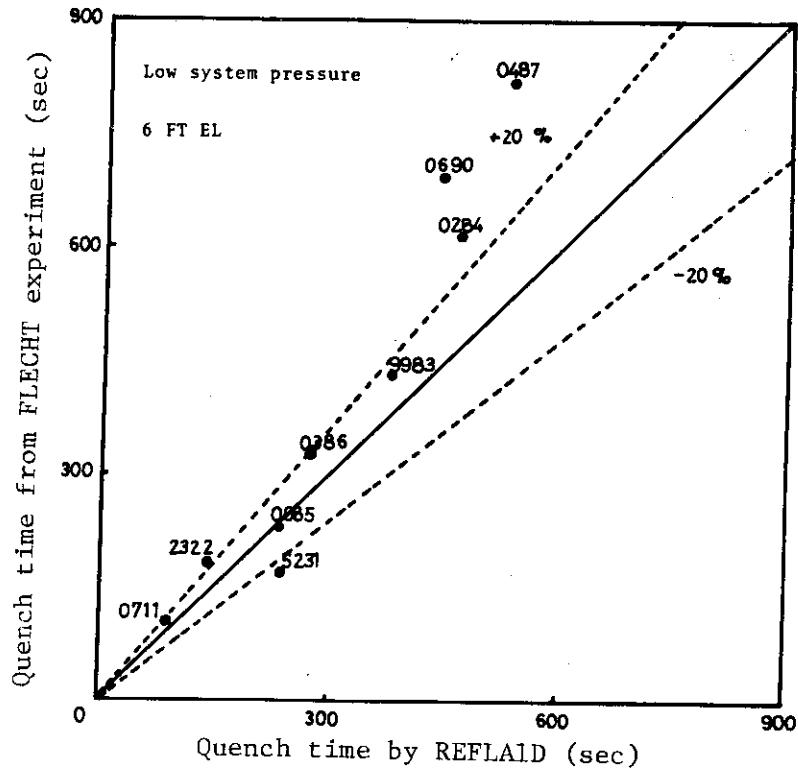


Fig. 3.10 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

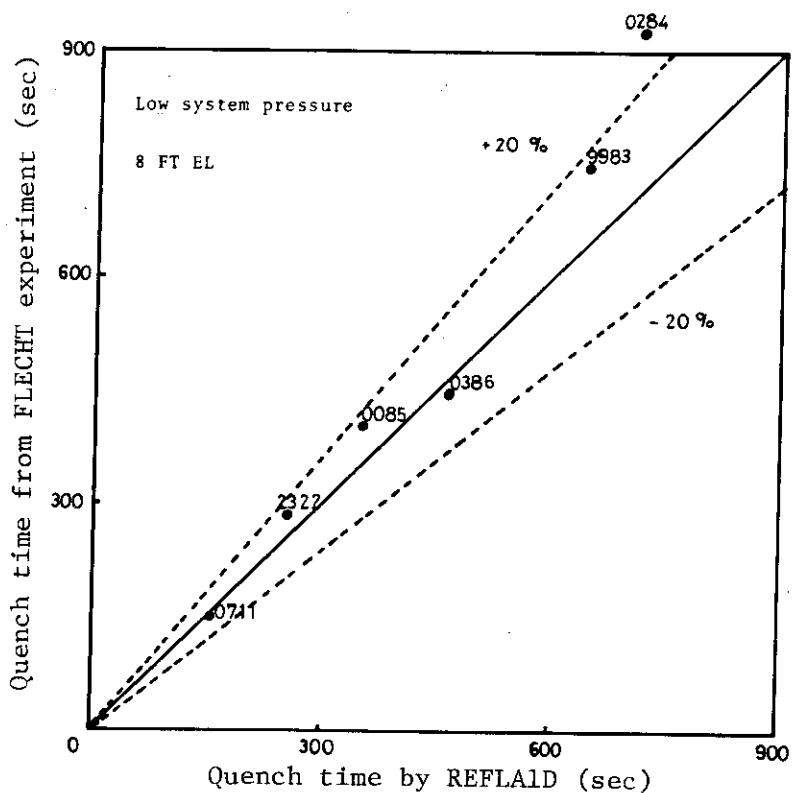


Fig. 3.11 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

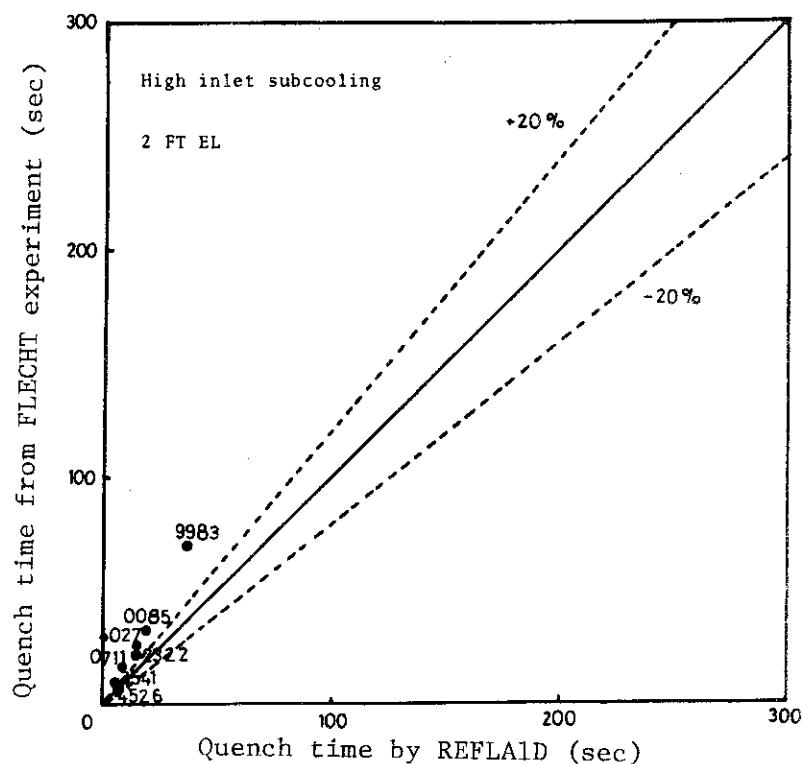


Fig. 3.12 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

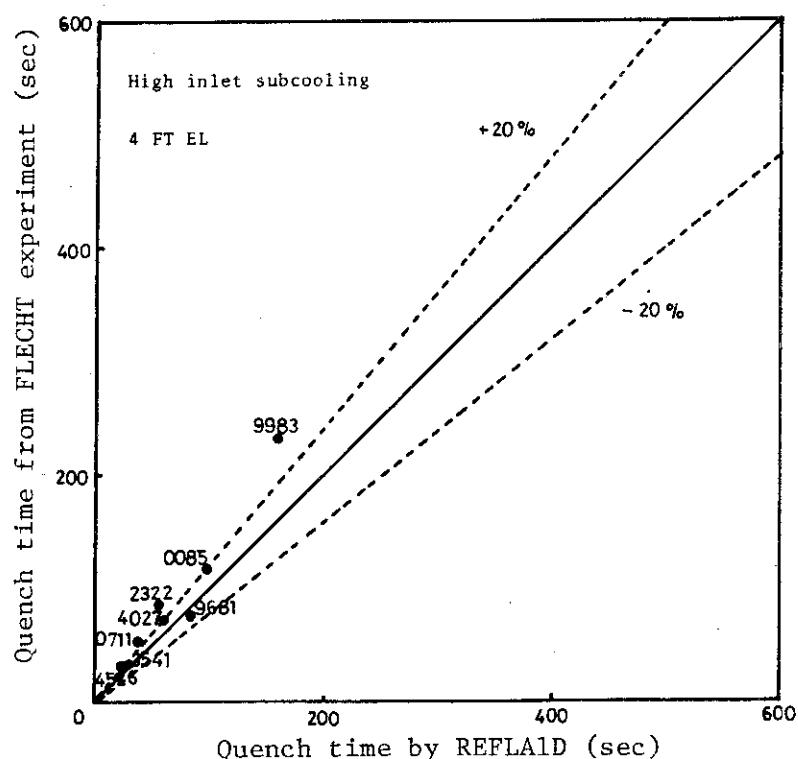


Fig. 3.13 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

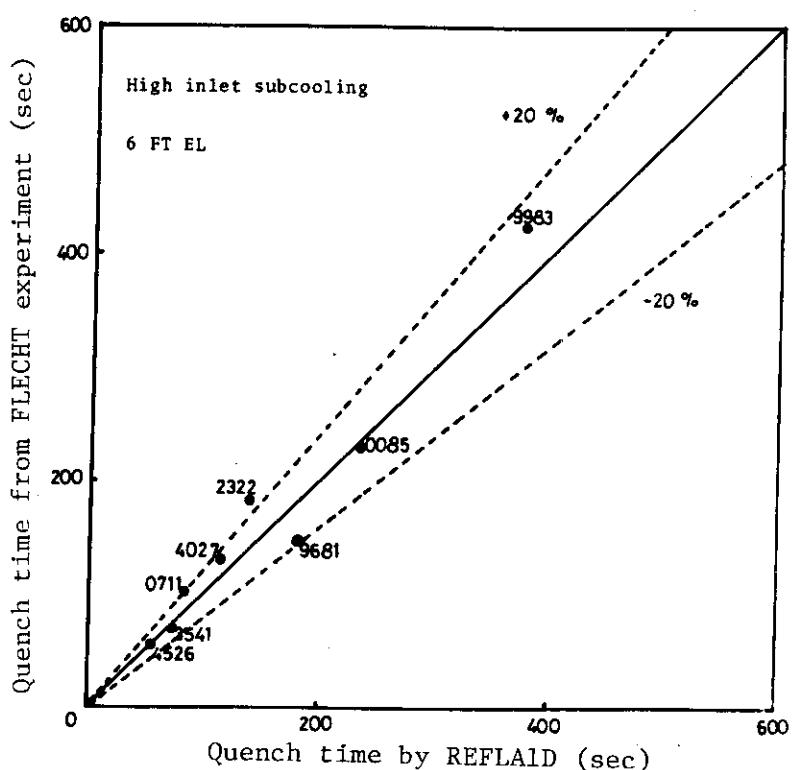


Fig. 3.14 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

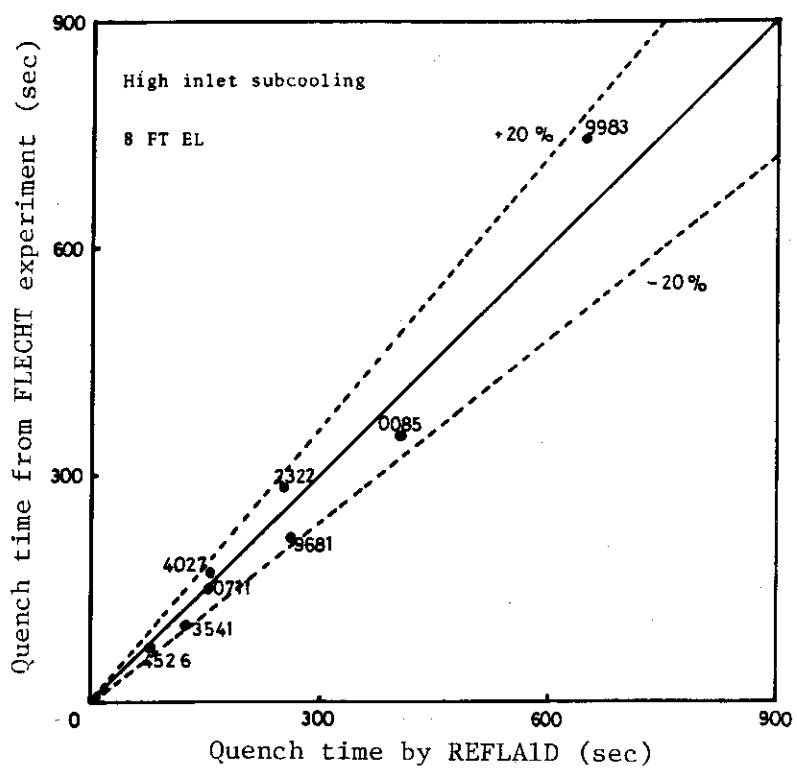


Fig. 3.15 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

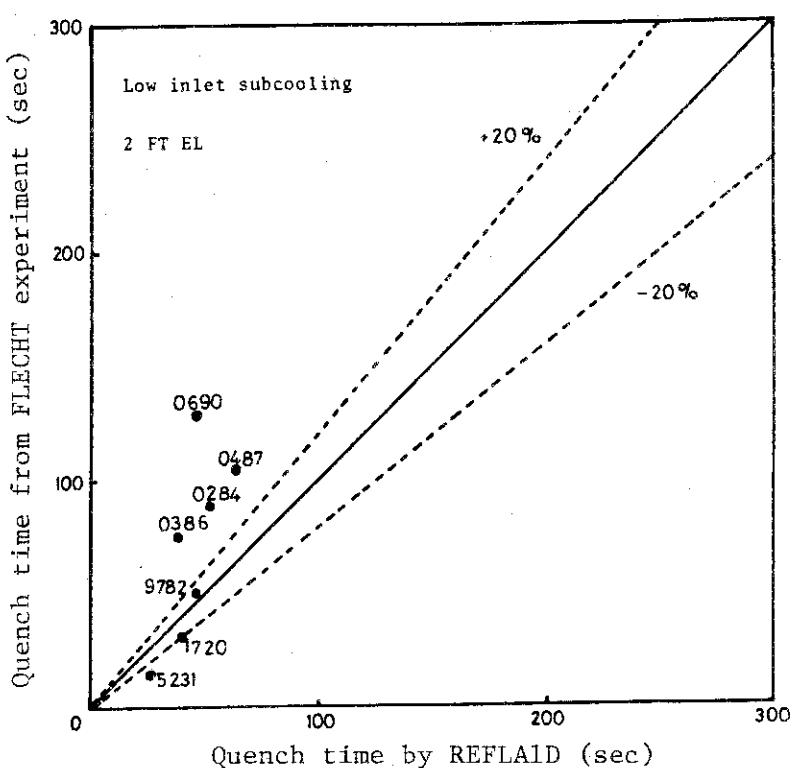


Fig. 3.16 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

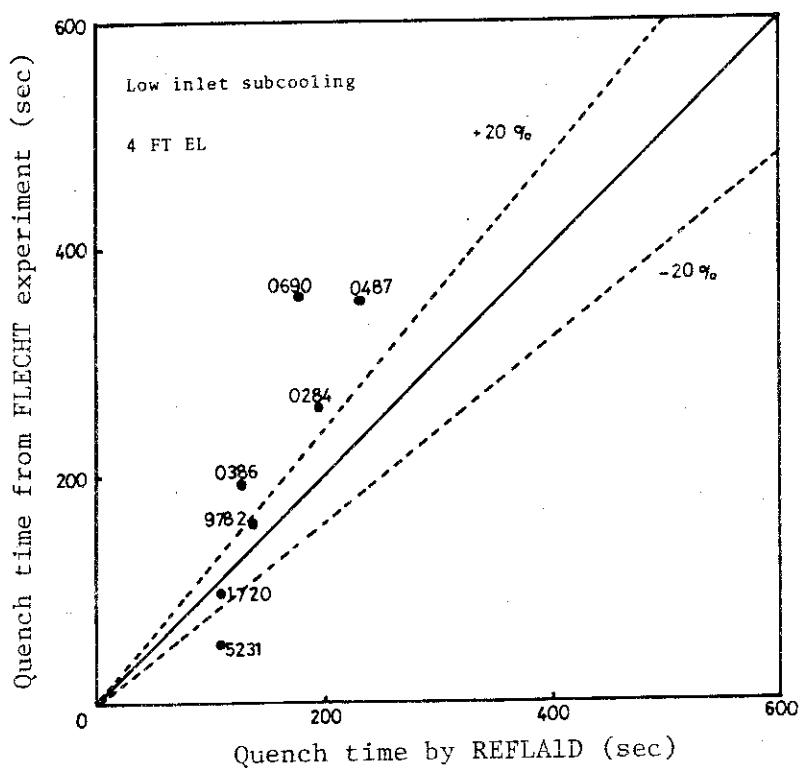


Fig. 3.17 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

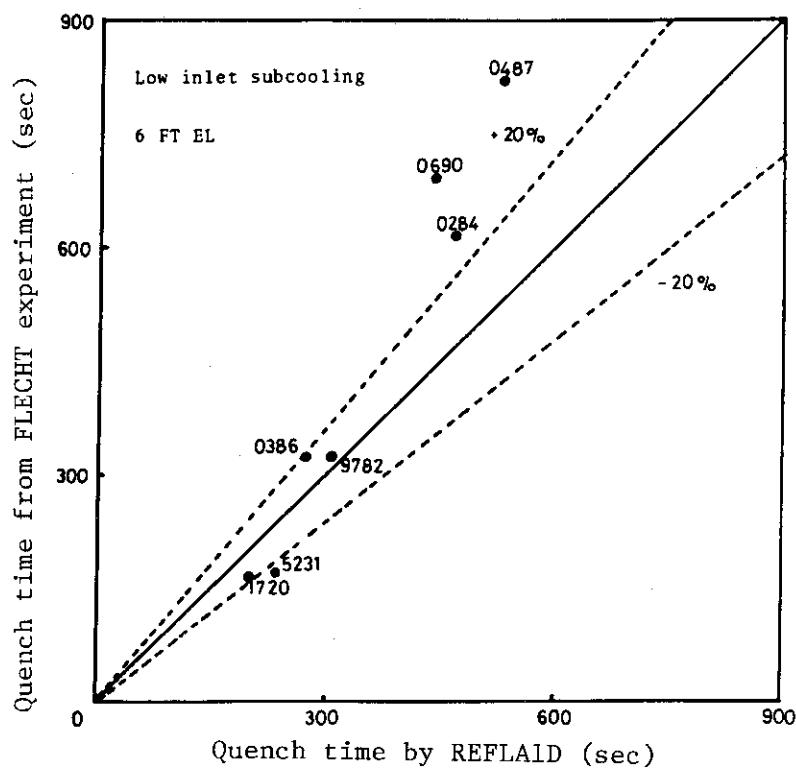


Fig. 3.18 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID

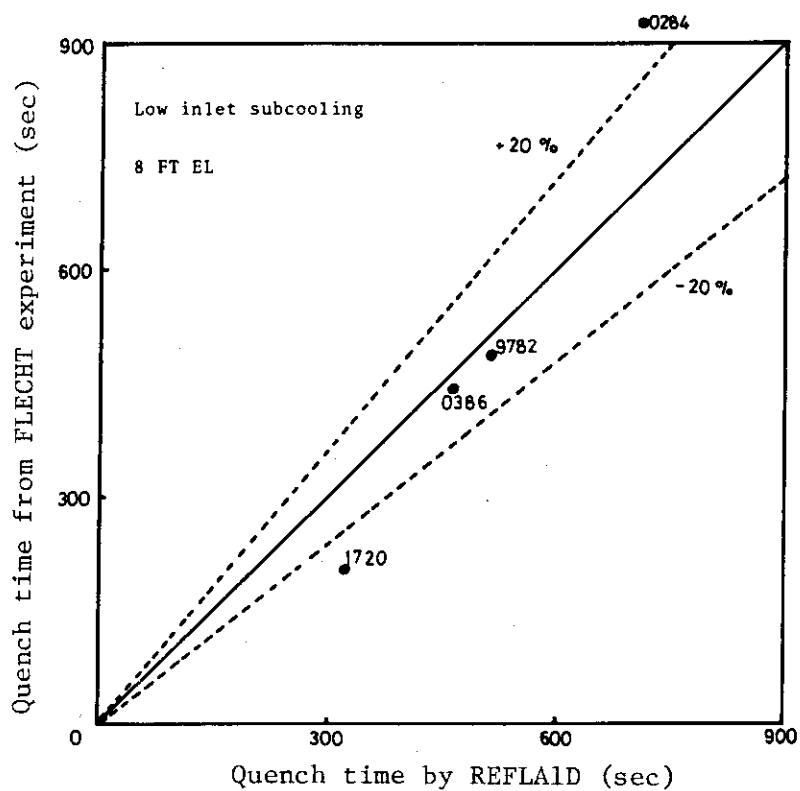
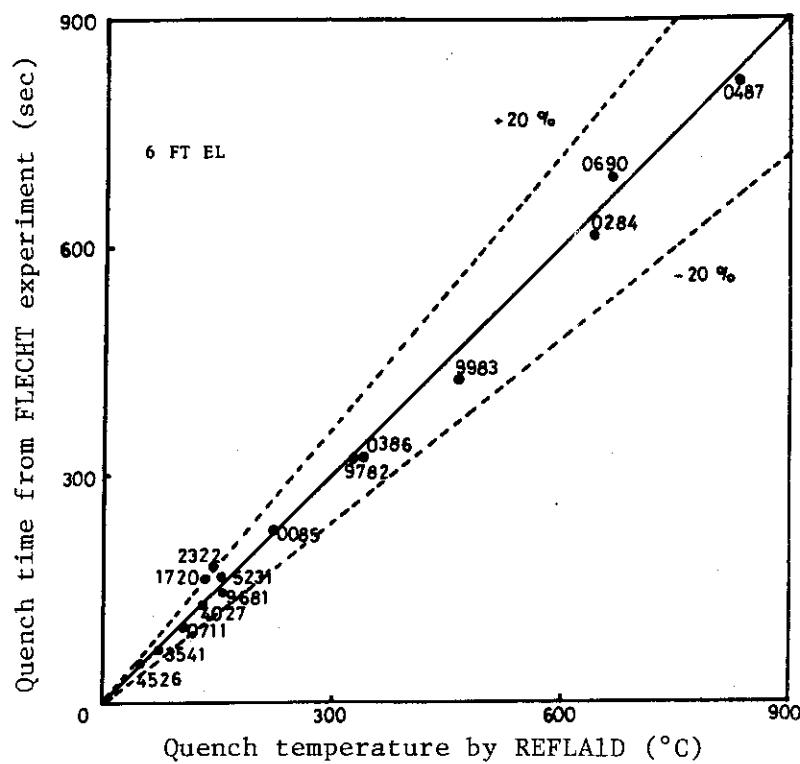
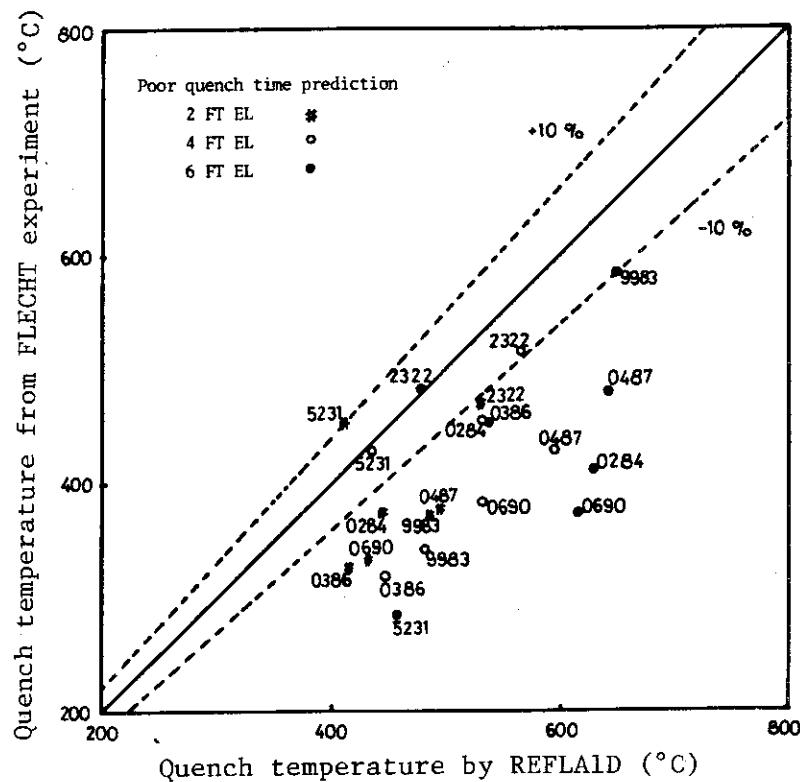


Fig. 3.19 Comparison of measured quench time with that computed by REFLAID



**Fig. 3.20** Comparison of measured quench time with that computed by FLECHT correlation



**Fig. 3.21** Comparison of measured quench temperature with that computed by REFLAID

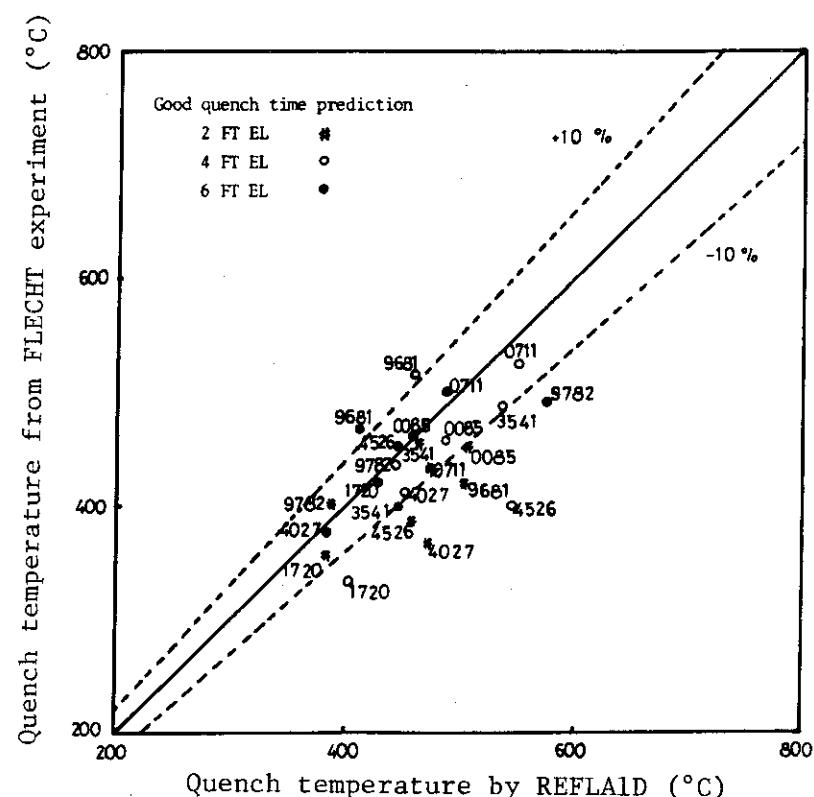


Fig. 3.22 Comparison of measured quench temperature with that computed by REFLAID

### 3.3 热伝達率の比較

热伝達率の時間変化については、炉心中央部（6 フィートの位置）のデータのみが公表されているので、他の位置の热伝達率とも比較するため、PWR - FLECHT の実験データの代りに、FLECHT 相関式<sup>(5), (6)</sup>により計算される热伝達率と REFLA - 1 D の計算結果とを比較することにする。

热伝達率の比較結果を Fig. 3.23 ~ 3.37 に示す。

3.1 に述べたのと同様に、REFLA - 1 D と FLECHT 相関式の热伝達率の時間変化で特徴的な差異は、液滴分散流から遷移流領域に移る部分に現われる。

REFLA - 1 D では热伝達モードが膜沸騰に変わり热伝達がステップ状に増加しているが FLECHT 相関式では徐々に増加している。

全体的に見て、2 フィート、4 フィート位置での热伝達率は REFLA - 1 D が FLECHT 相関式より大きい値を示している。FLECHT 相関式は 2 フィート位置には適用できないが、参考までに計算した。2 フィート位置の热伝達率は、FLECHT 実験と同じ傾向を示している。(Run 9782 の場合)

8 フィート、10 フィート位置の液滴分散流領域での热伝達率は、FLECHT 相関式と良い一致を示している。

クエンチ時刻が良い一致を示している場合でも热伝達率の時間変化までは一致していない。液滴分散流又は、遷移流領域の中間（時間的に）位までは、REFLA - 1 D がより大きい热伝達率を示し、その後は、クエンチ時刻までは、逆により小さい热伝達率を示し、全体としての热放出を相殺するような形になっている。

ただし、Fig. 3.1 に示すように、 $2.5 \sim 1.5 \text{ cm/sec}$  ( $1 \sim 0.6 \text{ in/sec}$ ) のような低冠水率の場合には、全体としての热放出率を相殺するような形でなく、ステップ状の膜沸騰部分は過大な热放出を与えており、これが、低冠水率で、クエンチ速度が実験より速くなる原因と考えられる。すなわち、低冠水率では、膜沸騰のような部分（すなわち、遷移流領域）は存在せず、クエンチフロントの下流に直接液滴分散流が存在している可能性がある。しかも、膜沸騰領域を除くことは热放出の減少ならびにその結果としての蒸気流速の減少をもたらし、再冠水初期の過熱蒸気流、又は液滴分散流領域の热伝達率を減少させ、実験と計算との差を縮める方向となる。

このように、遷移流部の改良が、REFLA - 1 D コードの再冠水予測能力の向上に重要であることがわかる。

なお、FLECHT 相関式の Period III は、膜沸騰热伝達モードであり、REFLA - 1 D でも、ステップ状に热伝達率が増加し、クエンチするまでの部分が膜沸騰である。

REFLA - 1 D と FLECHT 相関式の热伝達モードが膜沸騰になる時刻を各热電対位置毎に比較したものを、Table 3.17 に示す。

解析した全ての実験例について 4 フィート位置の膜沸騰開始は、REFLA - 1 D が早い。これらは、FLECHT 相関式との比であり、生の実験データとの比較ではないので、数値自体にあまり意味がないかもしれないが、傾向は、実験データとの比較と同様と思われる。

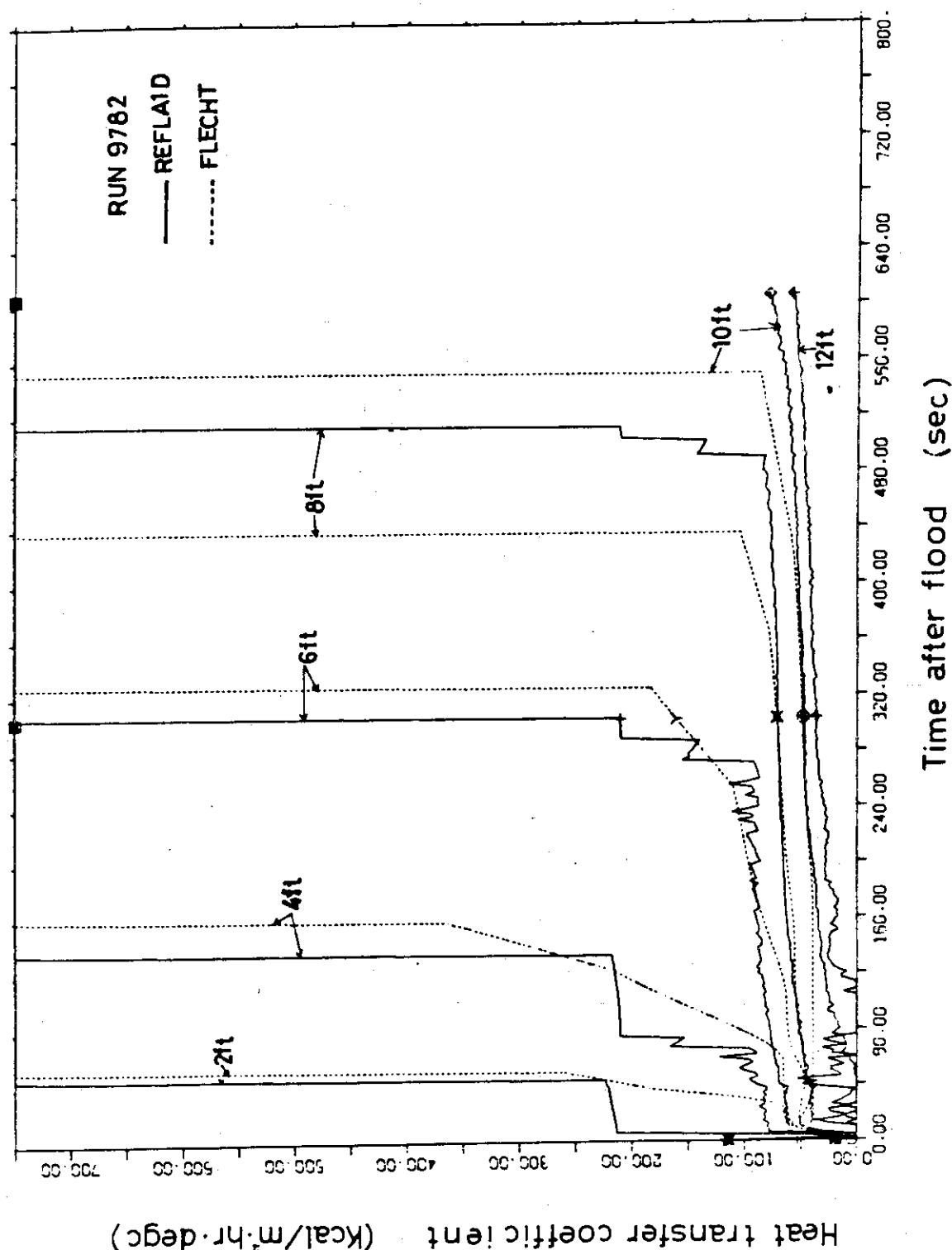


Fig. 3.23 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

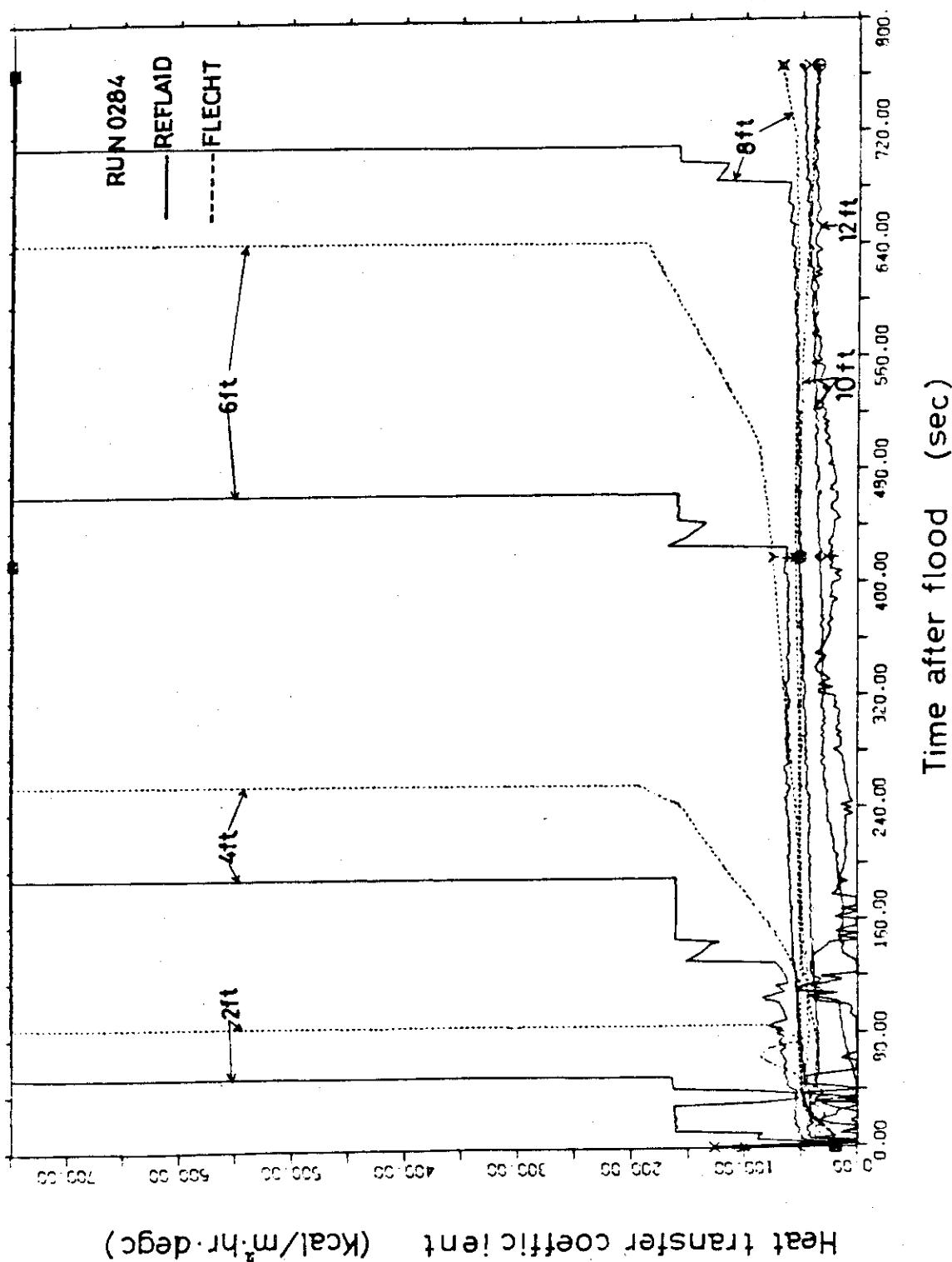


Fig. 3.24 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

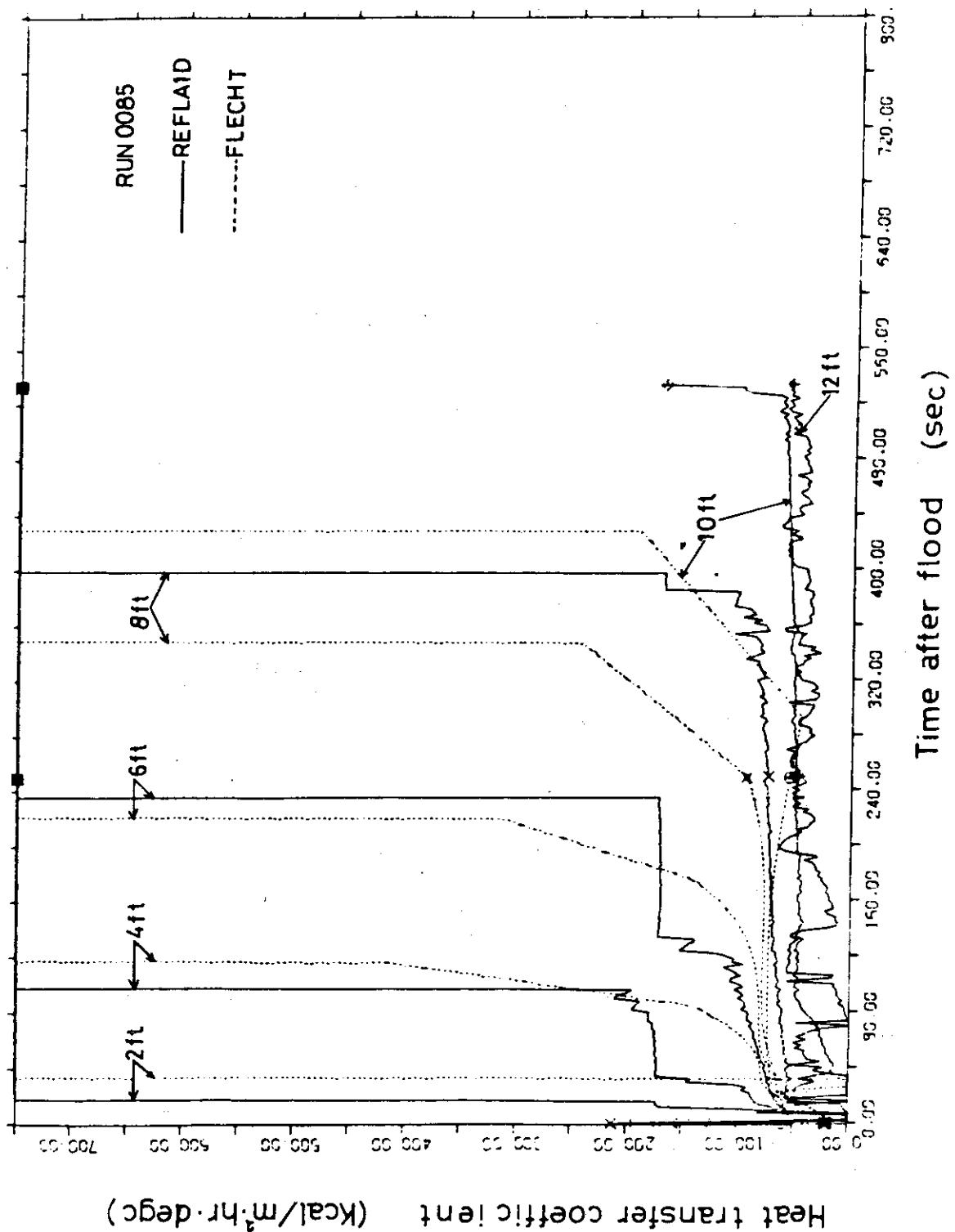


Fig. 3.25 Heat transfer coefficient REFRAID and FLECHT correlation

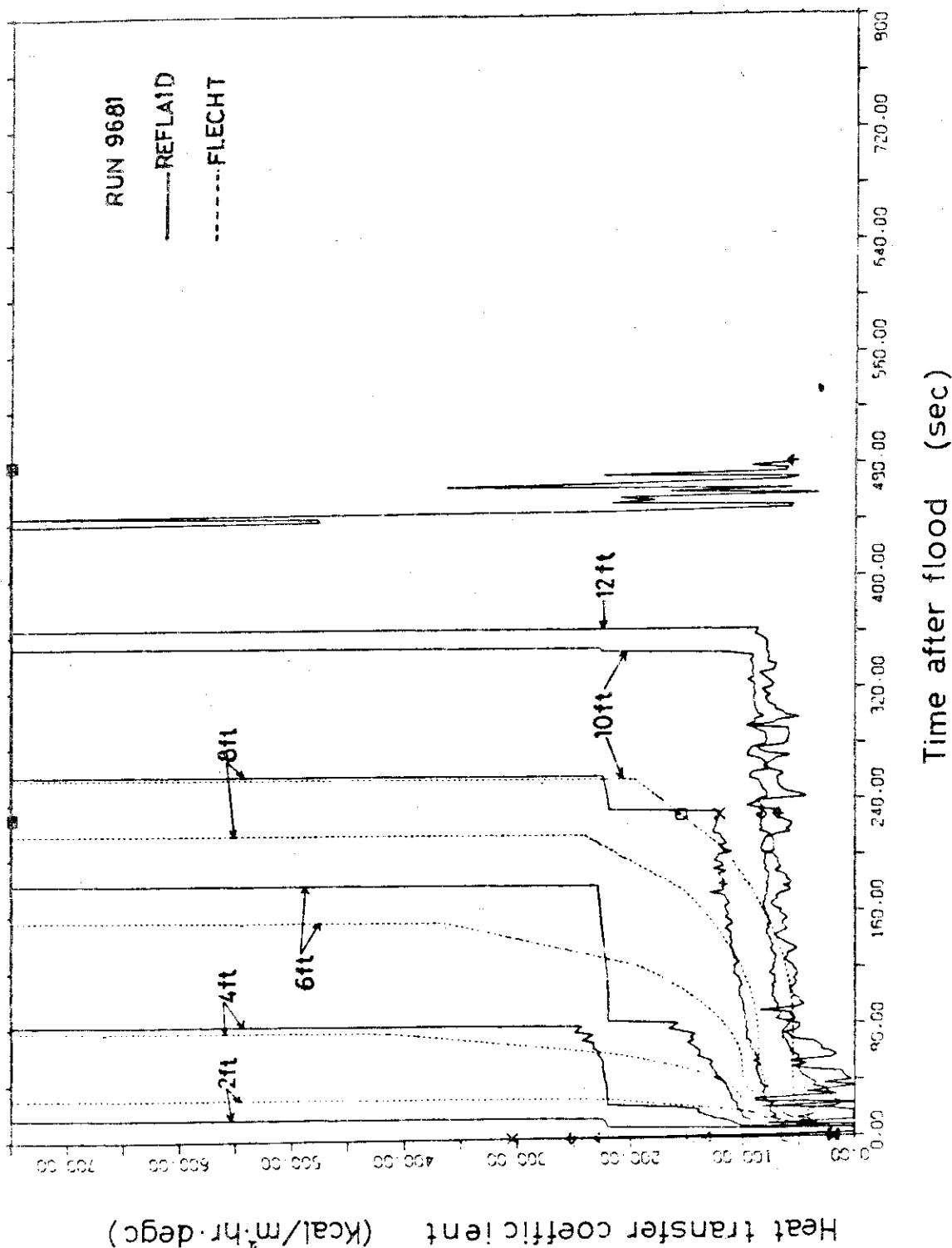


Fig. 3.26 Heat transfer coefficient REFLAND and FLECHT correlation

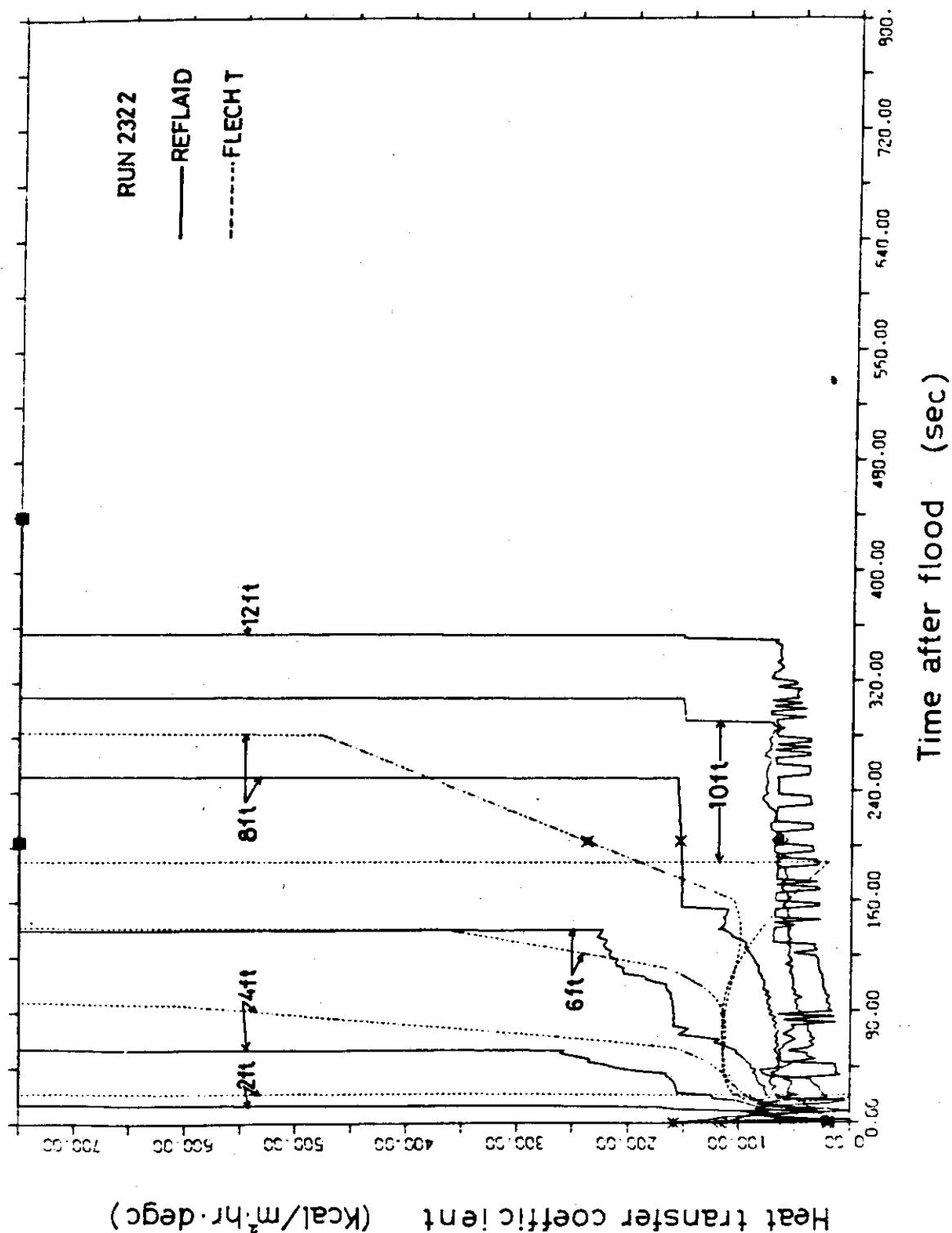


Fig. 3.27 Heat transfer coefficient REFRAID and FLECHT correlation

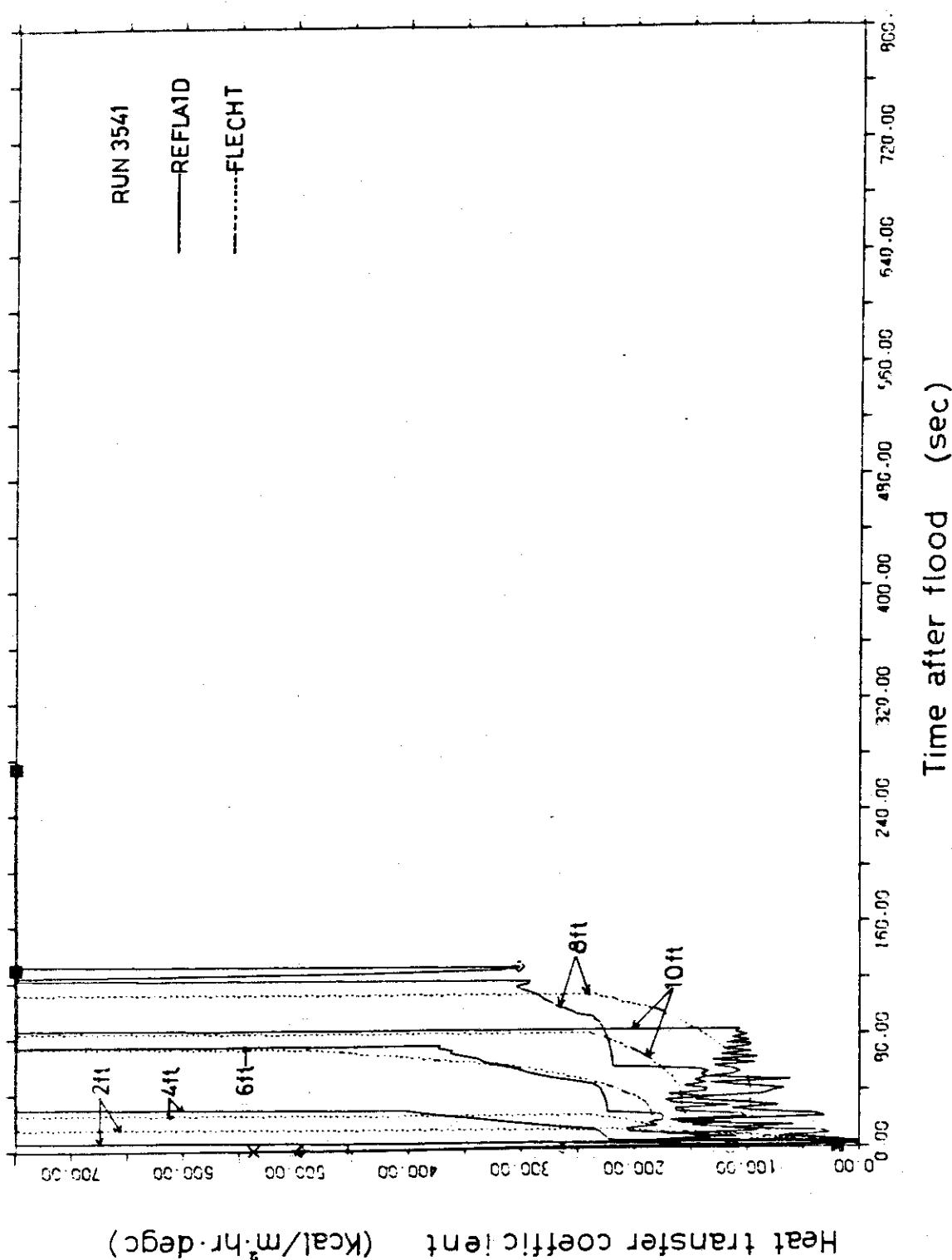


Fig. 3.28 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

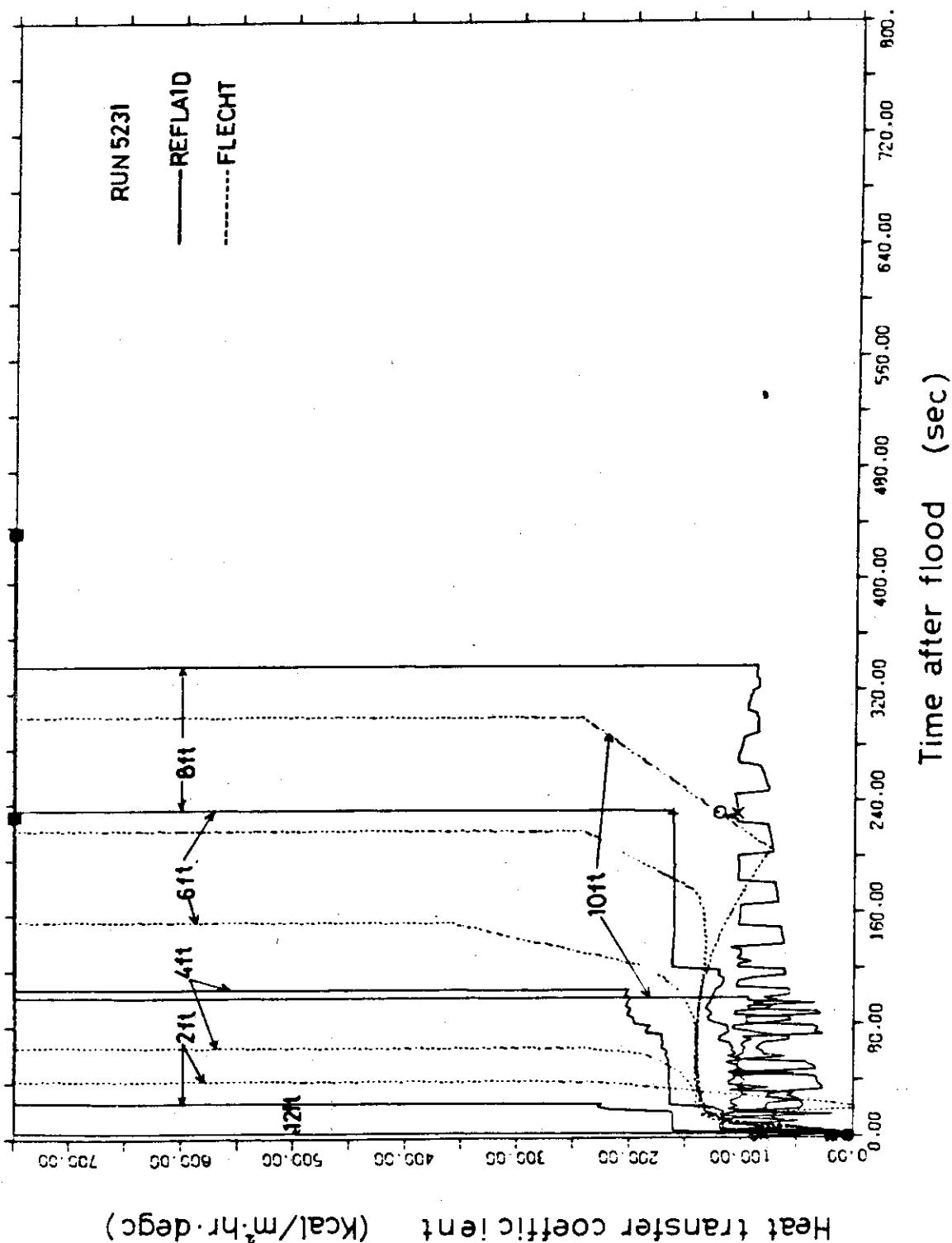


Fig. 3.29 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

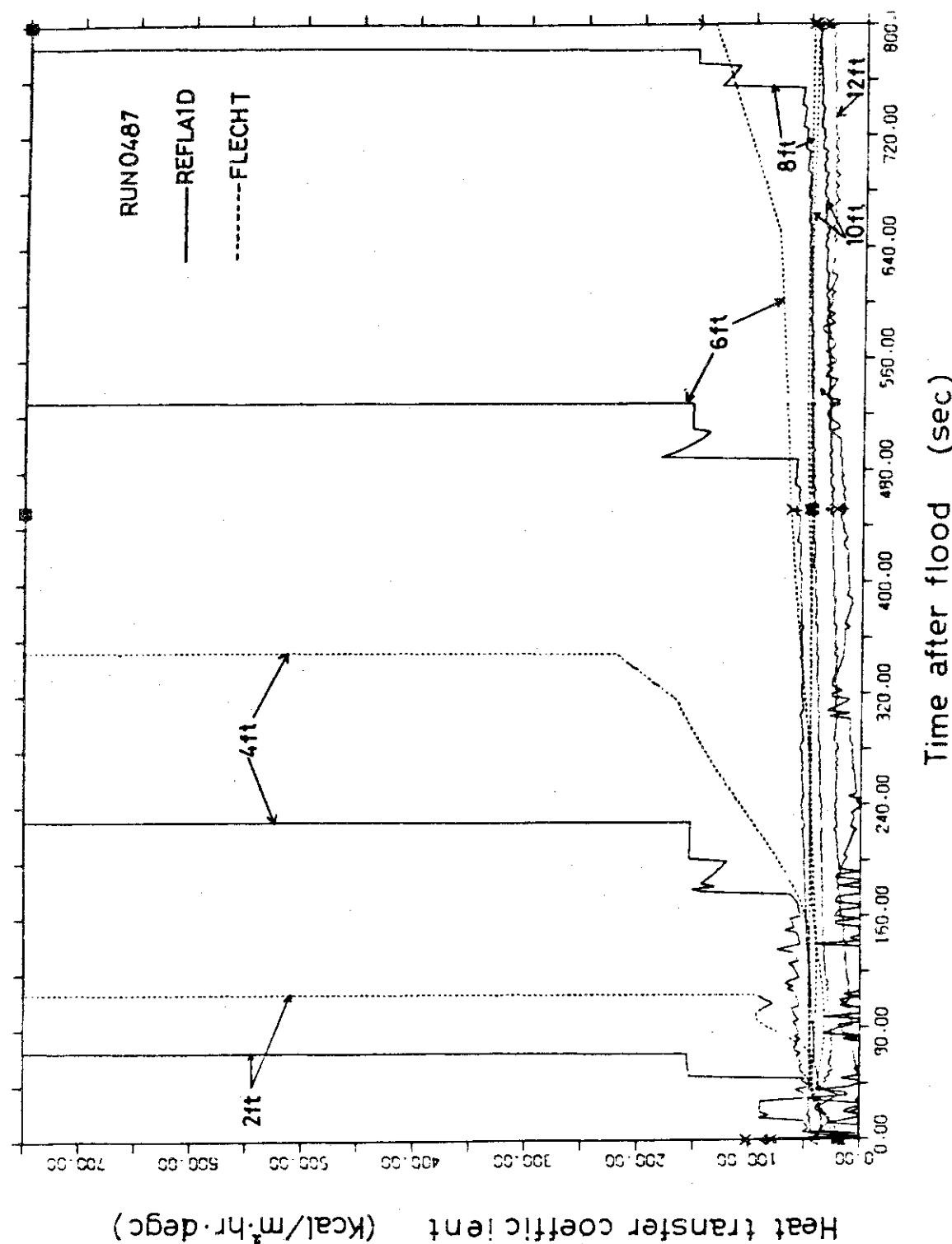


Fig. 3.30 Heat transfer coefficient REFRAID and FLECHT correlation

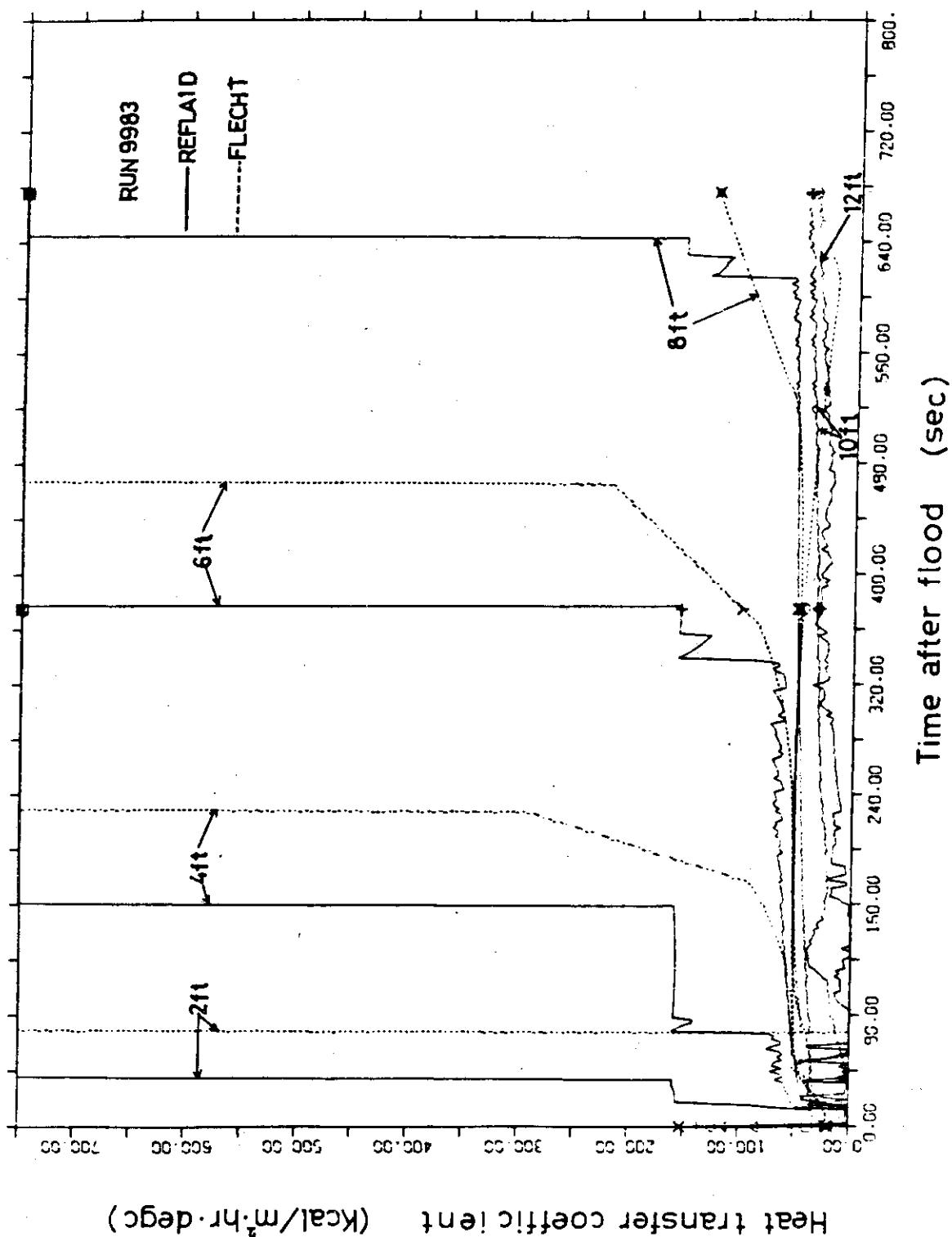


Fig. 3.31 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

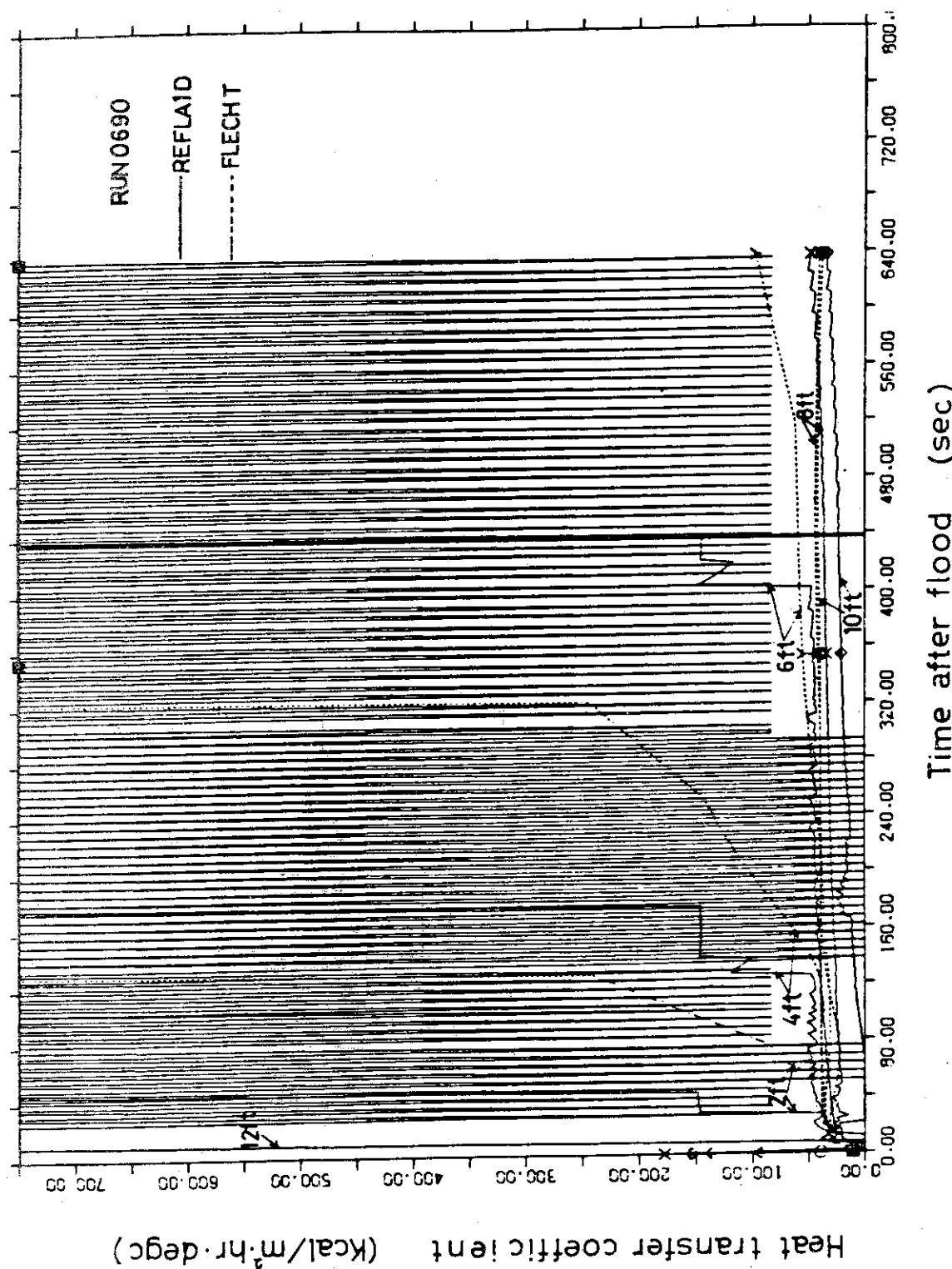


Fig. 3.32 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

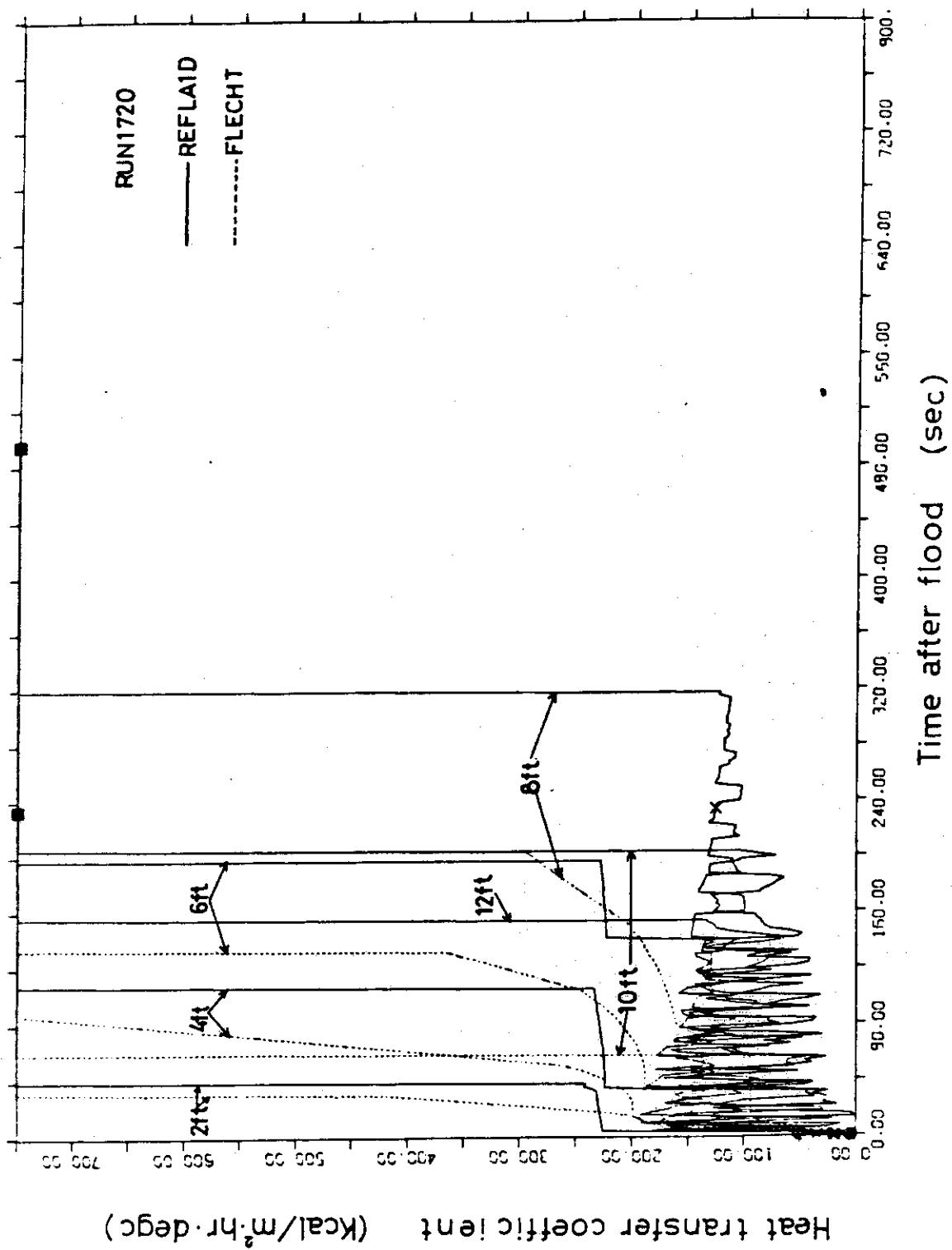


Fig. 3.33 Heat transfer coefficient REF LAID and FLECHT correlation

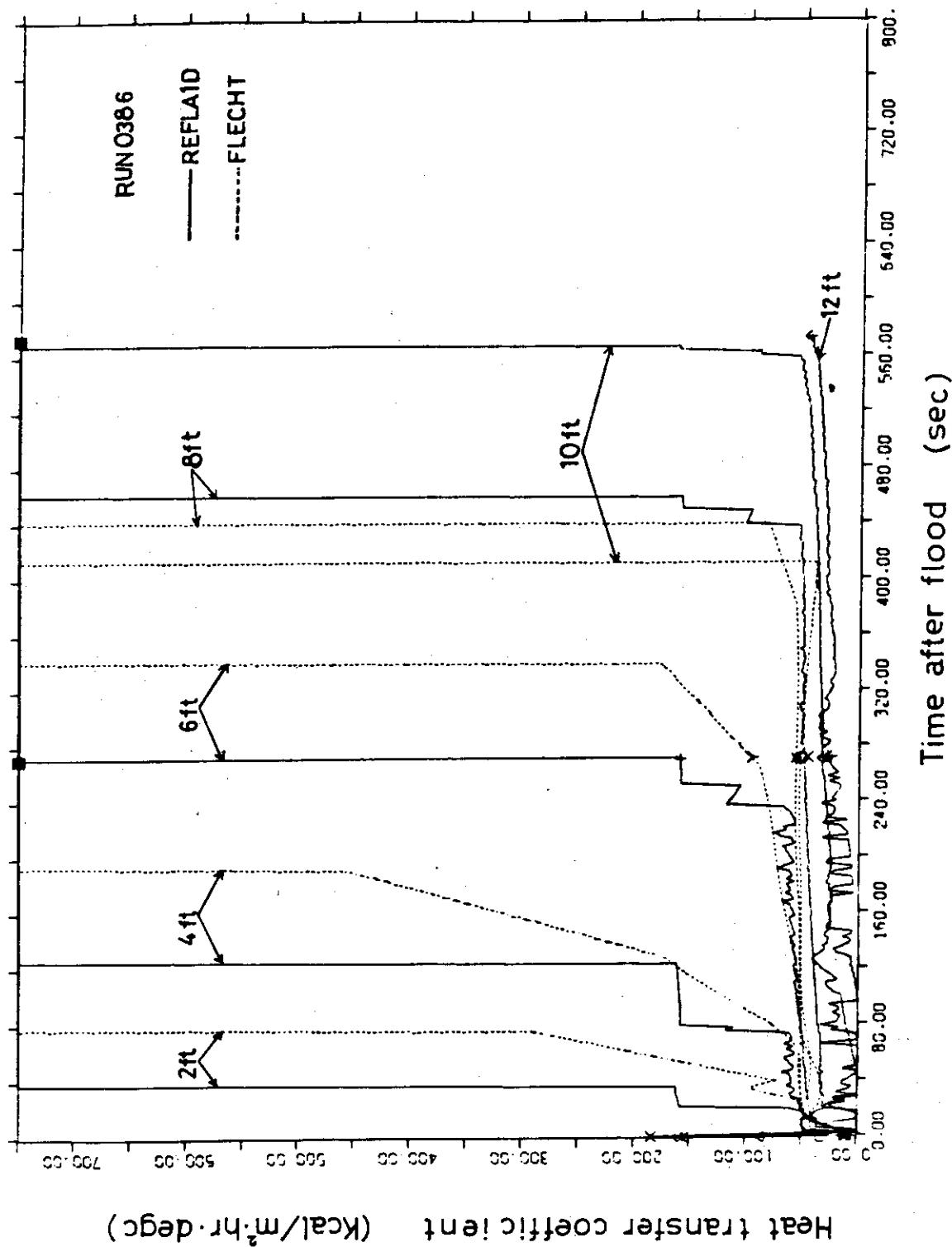


Fig. 3.34 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

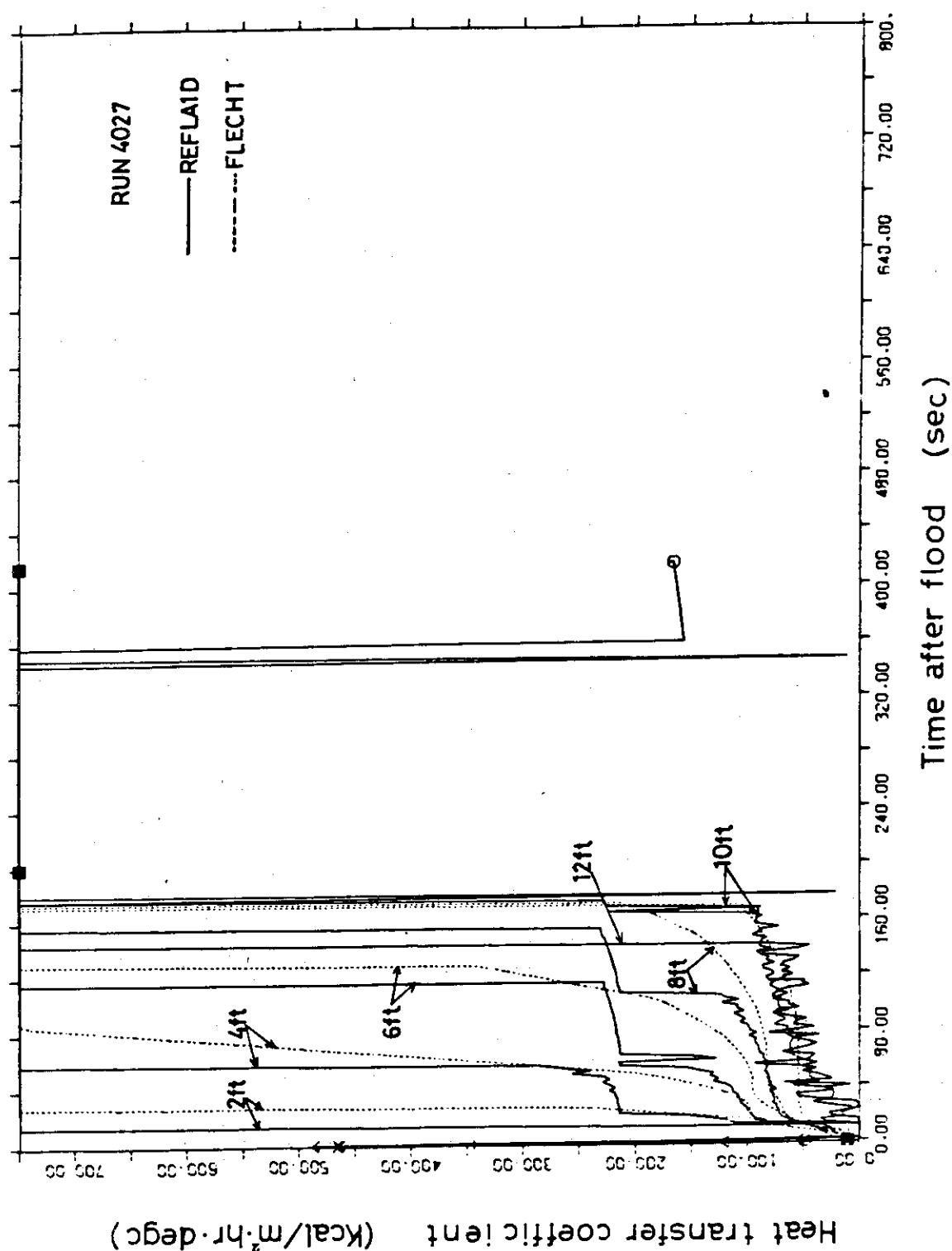


Fig. 3.35 Heat transfer coefficient REFRAID and FLECHT correlation

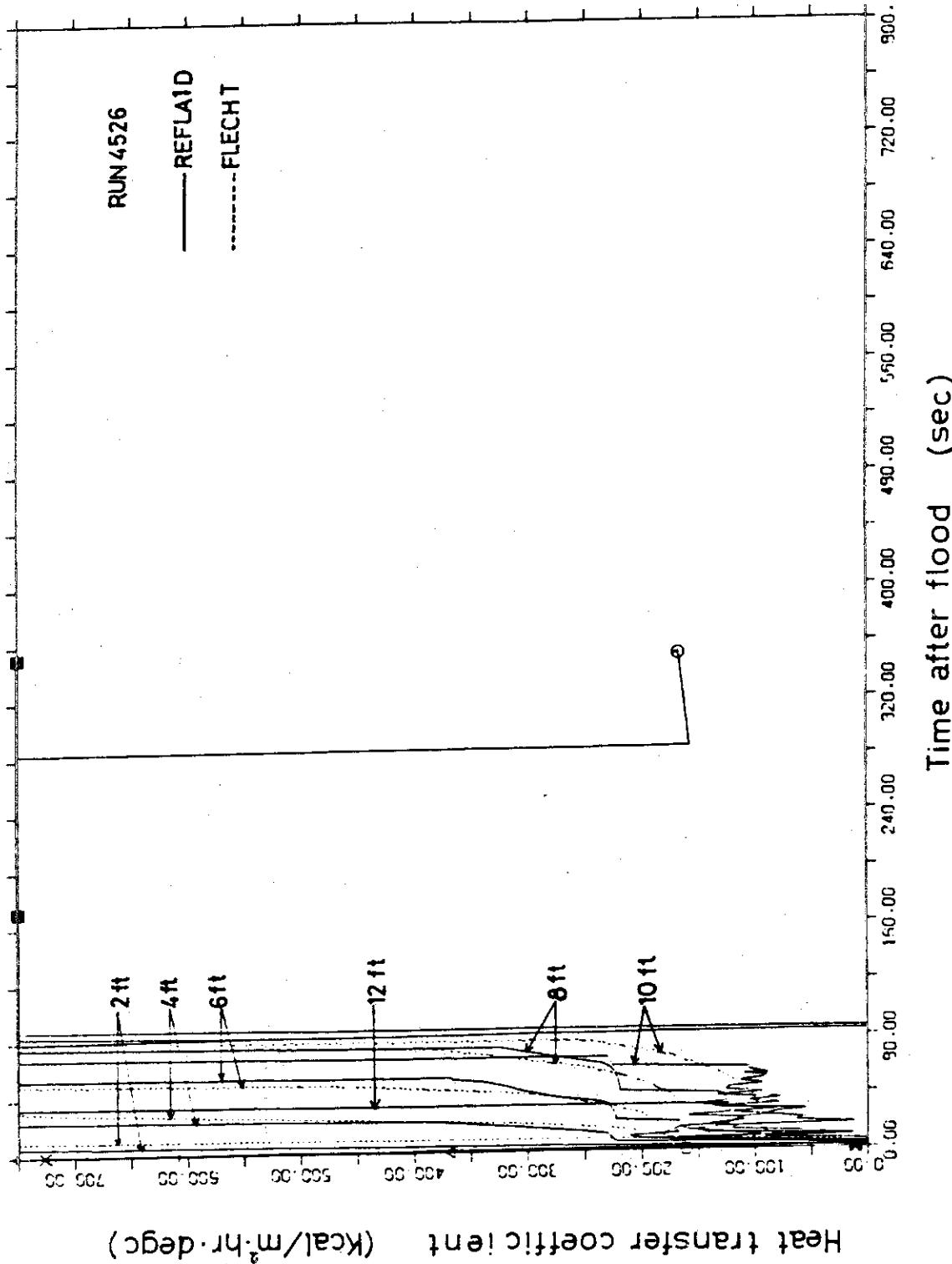


Fig. 3.36 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

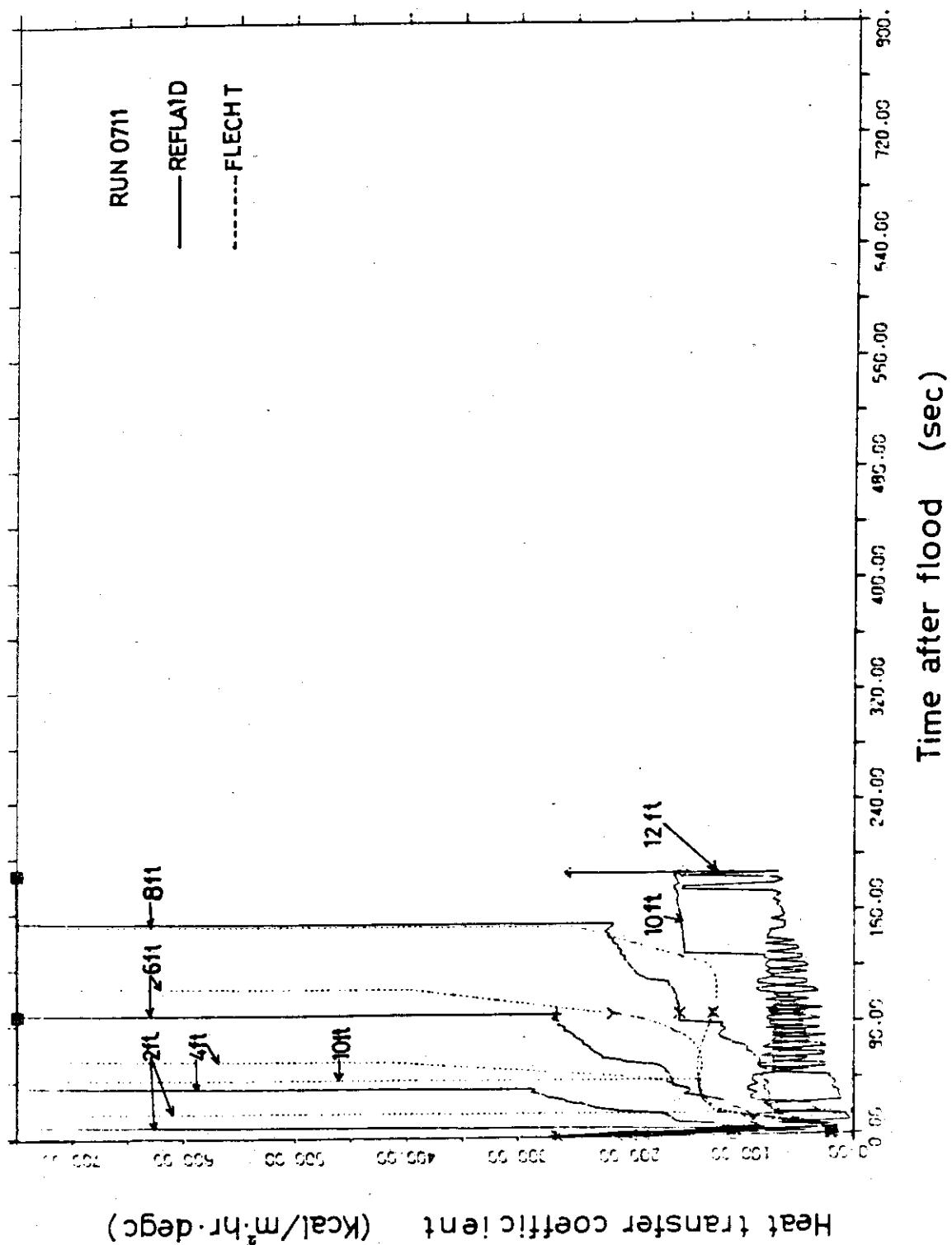


Fig. 3.37 Heat transfer coefficient REFLAID and FLECHT correlation

Table 3.17 Film boiling initiation time calculated by FLECHT correlation and REFLA-1D

(unit:seconds)

Run Number	REFLA1D FLECHT Correlation	Elevation		
		4 ft	6 ft	8 ft
9782	REFLA1D	76	290	504
	FLECHT	124	256	366
0284	REFLA1D	132	428	686
	FLECHT	244	502	720
0085	REFLA1D	34	134	386
	FLECHT	86	176	252
9681	REFLA1D	24	84	234
	FLECHT	60	124	178
2322	REFLA1D	22	64	154
	FLECHT	56	114	162
3541	REFLA1D	6	26	58
	FLECHT	30	62	86
5231	REFLA1D	24	122	340
	FLECHT	60	124	176
0487	REFLA1D	178	490	756
	FLECHT	318	652	
9983	REFLA1D	70	340	616
	FLECHT	178	364	522
0690	REFLA1D	128	404	
	FLECHT	254	520	
0386	REFLA1D	80	238	440
	FLECHT	130	268	382
1720	REFLA1D	36	142	320
	FLECHT	52	106	152
4027	REFLA1D	22	56	108
	FLECHT	52	104	150
4526	REFLA1D	6	22	42
	FLECHT	20	42	60
0711	REFLA1D	10	30	82
	FLECHT	42	86	124

## 4. ま と め

- (1) 冠水速度  $25 \sim 2.5 \text{ cm/sec}$ , 系圧力  $4 \text{ kg/cm}^2\text{a}$  の再冠水現象について, REFLA-1D の計算結果と FLECHT 実験結果とは, ほぼ良好な一致を示す。
- (2) 中央部のクエンチ時刻については, 上記の条件では,  $\pm 20\%$  の誤差範囲内で計算と実験とは一致する。  
又,  $2.5 \text{ cm/sec}$  より低い冠水速度についての計算と実験との一致は悪い。
- (3) クエンチ時刻については, 圧力が高く, 入口サブクール度の高い実験例に対して, REFLA-1D はよい一致を示す。又, 2 フィート, 4 フィートの位置よりも 6 フィート, 8 フィートの位置のクエンチ時刻の一致が良好である。
- (4) クエンチ時刻の一一致の良い実験例に対しては, 悪い実験例よりクエンチ温度の一一致も良い。  
したがって熱伝達を正しく評価できれば, クエンチ現象も正しく評価できるようになる。
- (5) 2 フィートの位置では, クエンチ速度, クエンチ温度とともに一致が良くなく, その原因是, 局所サブクール度が実験より計算において大であるためと考えられる。
- (6) 熱伝達率については, 遷移流領域で, ステップ状に約  $220 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  になりほぼ一定の値を維持し, クエンチに至るが,  $2.5 \text{ cm/sec}$  より大なる冠水速度では, 前半, 計算の方が実験より大で, 後半, 実験の方が大となり, 熱放出量は全体として相殺するようになる。  
しかし  $2.5 \sim 1.5 \text{ cm/sec}$  のような低冠水率の場合には, 熱伝達率はほとんど計算の方が大であり, 熱放出量は相殺されず, 過冷却となり, クエンチ速度を増加させるようになる。
- (7) 今後改良すべき点としては, ①クエンチフロントが低い時の液体温度の計算, ②遷移流領域のモデルの二項目が本質的なコードの変更を行わずに出来るものである。

参考文献

- (1) Murao, Y.; An Analytical Study of The Thermo-hydrodynamic Behavior of Reflood Phase during LOCA, to be published as KFK 2545.
- (2) Murao, Y.; Reflood Analysis Code REFLA-1D, Presented at 1977 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan (1977)
- (3) Murao, Y.; Present Status of Reflood Analysis Code (REFLA) Development, Presented at 1977 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan (1977)
- (4) Cermak, J.O. et al.; PWR Full Length Emergency Cooling Heat Transfer (FLECHT) Group I Test Report, WCAP-7435 (1970)
- (5) Cadek, F.F. et al.; PWR FLECHT Final Report Supplement, WCAP-7931 (1972)
- (6) Cadek, F.F. et al.; PWR FLECHT (Full Length Emergency Cooling Heat Transfer) Final Report, WCAP-7665 (1971)