

原子爐의 反應度와 溫度係數

(Temperature Coefficient of Reactivity)

盧 潤 來*
(Eunrae Roh)

論 文

15-5-1

Abstract

The stability and safety of operation of a reactor is determined mainly by the sign and magnitude of its reactivity responses to temperature changes. Reactors are subject to temperature fluctuations due to the changes in reactor power and ambient temperature. These temperature fluctuations cause reactivity disturbances through changes in the nuclear and physical properties of the core. Because of these important phenomena by the temperature effects, a large portion of study and testing on a reactor design has been conducted.

In this experiment the overall temperature coefficient of the TRIGA MARK-II reactor is measured. The basic procedure is to change the temperature of the water moderator, and from the movements of a newly re-calibrated control rod (this is necessary due to the effects of fuel burn-up and control rod depression) required to maintain criticality, the reactivity worth of the temperature change is determined.

From this measurement, the overall temperature coefficient seems to be smoothly varying, almost a linear function of temperature, and a value of approximately $-0.267\%/^{\circ}\text{C}$ can be obtained for an average temperature range from 17.6°C to 32.5°C .

1. 序 論

原子爐에서 核分裂에 의하여 發生된 에너지의 大部分은 熱로 나타나므로 비록 冷却材의 순환이 繼續되어도 溫度上昇은 不可避하게 된다. 爐心の 物理的 및 核의 特性은 溫度變化에 敏感하므로 爐内の 溫度와 中性子の 增殖 사이에는 어떤 作用이 存在한다. 單位 溫度上昇에 따른 中性子 增殖率(反應度)의 크기와 符號를 一般의 溫度係數라 한다.

이 溫度係數는 核燃料, 減速材, 反射體, 冷却材 등에 依한 局部 溫度係數의 綜合으로 간주되지만 各各의 局部 溫度係數는 全體의 溫度係數 符號와 같은 必要는 없다. 實際로 原子爐의 運轉에 있어서는 臨界點을 용이하게 유지하기 爲하여 可能한 最少值의 溫度係數가 要求되며 爐의 安全을 도모하고 動特性의 安定性을 爲하여 負가 되도록 設計한다.

Triga Mark-II에서 溫度反應의 一部는 集合體인 核燃料과 減速材의 溫度變化와 關聯을 갖게 된다. 即 核燃料과 減速材의 密着으로 因하여 即應된 負의 溫度係數 (Prompt negative temperature coefficient)가 이 燃料要素에 나타나는데, 이때의 出力 變化로부터 溫度係數의 作

用에 이르는 時間의 지연은 이 燃料要素 自身の 熱容量과 關聯을 갖는다. 爐內에서 溫度反應의 다른部分은 그릿드板의 幾何學的 空間의 變化로 因한 것이다. 이 그릿드板의 溫度係數로 因하여 爐 出力 變化에 이르는 反應度(Reactivity)의 反應은 核燃料에 依한 反應 보다 긴 時定數를 갖게 되는바 그 理由는 ① 核연료의 被覆과 冷却材를 통한 熱의 傳達이 上下의 兩 그릿드板까지 達하는데 時間이 要하며 ② 그릿드板 自體의 熱容量 때문이다.

本 實驗에서는 TRIGA MARK-II의 全 溫度係數(Overall temperature coefficient)를 測定하였는데 그 方法으로는 電熱器에 依하여 冷却水를 加熱하여 溫度變化를 Thermistor 로 감시(monitoring)하고 溫度變化에 따른 反應度の 變化는 較正된 Regulating rod를 零 出力에서 鹽界가 되도록 유지하므로써 測定 可能하였다.

II. 理 論

(I) 概 要

原子爐에서 溫度와 反應도와의 關係는 中性子の 에너지에 따라 細分된 多群 領域으로 취급하여 各 퍼라미터에 對한 溫度의 影響을 考慮함으로써 보다 正確한 相關性을 數量的으로 파악할 수 있으나 本論에서는 다만 二

* 原子力研究所 爐工學室

群 理論에 依하여 檢討코져 한다.

即 二群 臨界式(Two-group criticality equation)에서 中性子의 有效 增殖은

$$K_{eff} = \eta \epsilon \beta f \left[\frac{1}{1 + L^2 B^2} \right] e^{-\tau B^2} = \frac{K_{\infty} e^{-\tau B^2}}{1 + L^2 B^2} \dots\dots\dots(1)$$

但 η = 核연료에 흡수된 熱 中性子 하나에 對하여 發生된 速中性子 數

ϵ (fast fission factor) = u^{235} 核分裂에 依하여 發生된 速中性子 하나에 對하여 u^{238} Fast fission threshold 를 지나 減速된 速 中性子 數

p (resonance escape probability) = 速 τ 中性子가 熱 中性子로 減速되는 동안 共鳴 吸收(resonance absorption) 당하지 않을 確率

$e^{-\tau B^2}$ = fast nonleakage probability (L_1), τ 는 中性子 age 이고 B^2 는 Geometrical Buckling

$$\frac{1}{1 + L^2 B^2} = \text{Thermal Nonleakage probability} (L_2),$$

L = Thermal diffusion length

K_{eff} = 1 일 때 原子爐는 臨界狀態에 있어 中性子數는 時間에 無關係로 一定하며, $K_{eff} > 1$ 이면 中性子數는 增加하고 $K_{eff} < 1$ 이면 反對로 減少된다. 이 中性子數의 變化率을 다음과 같이 反應度(ρ)의 函數관계로 定義한다.

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \dots\dots\dots(2)$$

따라서 溫度係數는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d\rho}{dT} \dots\dots\dots(3)$$

但 T 는 溫度로 普通 섭씨(°C)로 表示한다.

通常으로 原子爐의 運轉에 있어서 爐의 安全과 安定性을 爲하여 全 溫度係數는 負가 되도록 設計된다. 이 때에는 臨界溫의 溫度가 上昇함에 따라 K_{eff} 는 하나(1) 보다 적어져서 爐는 臨界 未達된다. 反對로 de/dT 가 正이면 爐는 溫度上昇과 함께 더 많은 熱 에너지를 放出하여 臨界 超過되어 爐는 不安定하게 된다. 溫度上昇에 따른 反應度의 變化는 熱 中性子の 에너지가 增加되어 吸收 斷面積(極히 적으나 散亂 斷面積도 영향 받음)의 變化를 일으키고 또한 溫度 變化에 따른 爐 材料의 密度 變化로 平均 自由行路와 Nonleakage probability가 變化되기 때문이다. 上記 두 理由 以外에서 幾何學的 Buckling에 依한 體積 變化도 重要한 역할을 한다.

理論적으로 溫度係數는 核 斷面積의 영향 基因한 核 溫度係數와 密度 및 體의 變化에 基因한 密度 溫度係數로 兩分한다.

(2) 核 溫度係數(Nuclear temperature coefficient)

爐心이 核燃料과 減束材로서만 構成 되어있고 吸收 斷面積은 $1/v$ 法則에 따른다고 假定하면 中性子の 運動에

너지($= \frac{1}{2}mv^2$)는 絕對 溫度(T)에 比例하므로 結局

$$\delta_a = \delta_{a0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}} = \delta_{a0} \theta^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{但 } \theta = \frac{T}{T_0} \dots\dots\dots(5)$$

δ_a = 絕對 溫度 T 에서의 吸收 斷面積

δ_{a0} = 絕對 溫度 T_0 에서의 吸收 斷面積

한편 散亂 斷面積은 吸收 斷面積에 比하여 溫度 增加에 對한 變化가 적으나 똑 같이 취급할 수 있으므로 Diffusion length의 自乘은

$$L^2 = \frac{1}{3\Sigma_a\Sigma_t} = \frac{1}{3\Sigma_a\Sigma_{t0}} \cdot \frac{1}{\theta^{-(\frac{1}{2}+n)}} = L_0^2 \theta^{\frac{1}{2}+n} \dots\dots(6)$$

但, Σ_t 는 巨視的 輸送 斷面積.

n 는 散亂 指數로 0.1 單位.

또한, Fermi age equation에 依한 Age는 fission energy에서 Thermal까지 다음 式으로 表示된다.

$$\begin{aligned} \text{即 } \tau &= \int_{E_{th}}^{E_0} \frac{\xi \Sigma_s}{D} \cdot \frac{dE}{E} = \int_{E_{th}}^{E_0} \frac{1}{3\Sigma_s \Sigma_t \xi} \frac{dE}{E} \\ &= \tau_0 - \int_{E_{th0}}^{E_{th}} \frac{1}{3\Sigma_s \Sigma_t \xi} \frac{dE}{E} \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

τ 와 τ_0 는 T 와 T_0 에서의 熱 中性子の Age이고 이에 해당하는 各各의 Thermal energy는 E_{th} , E_{th0} 이다.

式(7)에서 $|n| \ll 1$ 이면

$$\tau = \tau_0 - \left(\frac{1}{3\xi\Sigma_s\Sigma_t} \right)_0 \ln\theta \dots\dots\dots(8)$$

그런데 原子爐의 모든 吸收體는 式(4)에 따름다고 보므로 Thermal utilization factor (f)는 溫度 變化에 無關係고 다만 Resonance escape probability(p)만이 多少 할 수 있으나 一般적으로 k_{∞} 는 溫度의 變化에 無關係하다고 考慮한다.

大型 爐에서 式(1)의 k_{eff} 는 $k_{eff} = \frac{k}{1 + M^2 B^2}$ 로 表示되므로 定義에 依하여 反應度(ρ)는

$$\rho = \frac{K - 1 - M^2 B^2}{K} = \frac{K - 1 - B^2(L^2 + 7)}{K} \dots\dots\dots(9)$$

式(9)에 式(6)과(8)을 代入하면

$$\rho = \frac{K - 1}{K} - \frac{B^2}{K} \left[7_0 - \left(\frac{1}{3\xi\Sigma_s\Sigma_t} \right)_0 \ln\theta + L_0^2 \theta^{\frac{1}{2}+n} \right] \dots\dots(10)$$

密度가 一定한 狀態에서의 核 溫度係數 $\left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_d$ 는

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right] &= \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial T} = - \frac{B^2}{KT_0} \left[- \left(\frac{1}{3\xi\Sigma_s\Sigma_t} \right)_0 \theta^{-1} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{2} + n \right) \theta^{n-\frac{1}{2}} L_0^2 \right] \\ &= T = T_0 \text{ 때} \end{aligned}$$

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_d = - \frac{B^2}{KT_0} \left[- \left(\frac{1}{3\xi\Sigma_s\Sigma_t} \right)_0 + \left(\frac{1}{2} + n \right) L_0^2 \right] \dots\dots(11)$$

앞에서는 核分裂 生成物質의 毒性 作用(poisoning)에 따른 核 溫度係數의 影響은 考慮치 않았으나 一般의으

로 溫度가 上昇하는 경우 毒物(poison)에 依한 吸收斷面積은 減少되므로 反應도는 增加된다. 따라서 이 正의 反應도를 補償할 만한 負의 反應도가 存在치 않는 限 原子爐는 溫度 變化에 不安定할 수 있다. 그러나 多幸히 共鳴(resonance) 近方에 到達되면 毒物の 吸收는 急增加고 反應도의 溫度係數는 反對로 負가 된다.

(3) 密度 溫度係數(Density temperature coefficient)

溫度 上昇은 爐 材料의 膨脹을 일으키므로 吸收 및 散亂 平均 自由行路와 全般的인 크기의 變化를 가져오므로 反應도에 影響을 미친다. 勿論 液體 金屬 冷却材를 使用하는 爐에서는 冷却材의 推出때문에 일어나는 反應도의 變化도 있으나 本論에서는 上記 두 理由를 主로 취급한다.

이제 溫度 上昇에 따른 密度 變化가 모든 構成 材料에 똑같은 모양으로 影響을 끼치는 均質 系統(Homogeneous System)이라면

$$L^2 + \tau = L_0^2 \left(-\frac{d_0}{d} \right)^2 + \tau_0 \left(-\frac{d_0}{d} \right)^2$$

$$\text{또는 } M^2 = M_0^2 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2$$

但 M^2 = 온도 T 에서의 Migration area

M_0^2 = 온도 T_0 에서의 Migration area

d = 온도 T 에서의 密度

d_0 = 온도 T_0 에서의 密度

上式을 式 (9)에 代入하면

$$\rho = \frac{K-1}{K} - \frac{B^2 M_0^2}{K} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2$$

萬一體積(B^2)과 斷面積(σ_a, ρ_s)이 一定하다면

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_{\sigma_a, \rho_s} = \frac{2B^2 M_0^2}{K} \frac{d_0^2}{d^3} \frac{\partial d}{\partial T} \dots\dots\dots(12)$$

지금 材料의 線 膨脹係數 δ 를 導入하면 密度 d 는

$$d = \frac{d_0}{[1 + \delta(T - T_0)]^3}$$

上式에서

$$\frac{\partial d}{\partial T} = -\frac{3\alpha d_0}{[1 + \delta(T - T_0)]^4}$$

이 값을 式 (12)에 代入하면 $T = T_0$ 때

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_{B^2, \sigma_a, \rho_s} = -\frac{6\alpha B^2 M_0^2}{K} = -\frac{6(K-1)}{K} \alpha \dots\dots\dots(13)$$

式 (13)은 溫度의 變化에 따라 系統의 幾何學的 크기 (따라서 Buckling 도)와 吸收 및 散亂 斷面積이 一定하고 다만 密度만 變한다고 假定 했을때의 溫度係數이다. 다음에 爐의 크기가 全般的으로 變함에 따라 反應도의 變化는 極少하지만 그 影響은 主로 Buckling의 變化에 基因하므로

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial B} \right]_{\sigma_a, \rho_s} = -\frac{2BM^2}{K} = -\frac{2(K-1)}{KB} \dots\dots\dots(14)$$

또 爐心の 形狀이 球, 圓柱, 四角柱임을 不問하고 溫

度 變化에 따른 Buckling의 變化率은 $\frac{dB}{dT} = -\alpha B$ 로 주어지므로,

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_{\sigma_a, \rho_s} = \frac{\partial \rho}{\partial B} \frac{\partial B}{\partial T} = -\frac{\partial(K-1)}{K} \alpha \dots\dots\dots(15)$$

以上の 公式 (11)과 (13), (15)에서 各核 및 密度 溫度係數에 關한 理論의 考察을 시도하였으나, 實驗에 依한 個別的 實測은 不可能하며 다만 全 溫度係數의 實測이 可能하고 덩어리(lump)別로 그릿드(上 및 下端)板에 依한 溫度係數, 燃料에 依한 溫度係數 等の 實驗이 行하여진바 있다.

그림 1은 代表的인 LWR의 溫度 上昇에 따른 溫度係數의 變化를 보인다. 그림에 보이는 바와 같이 沸騰(Boiling)溫度에서 負의 反應도가 현저히 增加함은 爐의 Void effect 때문이다.

III. 實驗 機器

(1) TRIGA MARK-II Reactor

(2) 減速材(冷却水) 加熱用 電熱器

220 V 定格에서 13.5 KW 水中 電熱器 2 個를 使用했음

(3) 溫度 測定 裝置

減速材(冷却水) 溫度 測定用으로 Ferwal Electronics 製인 Thermistor(Type KB 22 L4)를 5 個 使用하여 平均溫度를 取하였음. 同 Thermistor의 特性은 25°C에서 200 ±10% 이고 時定數는 2 秒이다.

먼저 Thermistor 各各의 特性 曲線을 그림 2~6에서와 같이 표준 溫度計로 調整하고 임피던스 브릿지로 測定한 抵抗值를 較正曲線上에서 溫度로 轉換하였음.

IV. 實驗 方法

廣範圍한 溫度 領域을 얻기 爲하여 熱 交換器로 冷却水를 일단 순환시켜 그 溫度를 떨어 트린 後, 熱器와 Thermistor를 爐內에 裝置시키고 Safety rod를 up, Shim rod를 一定한 位置(position indication 530)에 유지하고 Regulating rod를 調整하여 零 出力(1 Watt)에서 臨界 되도록 하였음. 臨界點에 達한 後, 電熱器로 冷却水를 加熱하면서 溫度 上昇에도 不拘하고 臨界點을 계속 유지 할 수 있도록 Regulating rod의 位置를 調整하고 그림 7과 같이 미리 較正된 Regulating rod의 Reactivity worth curve 上에서 Reactivity의 變化量을 求하였음.

V. 實驗 結果

減速材인 冷却水의 溫度 上昇과 零 出力 臨界點을 유지하기 爲한 regulating rod의 位置 調整值를 表 1에 表示한다.

同 Rod의 位置 變化는 그림 7에 보인 較正 曲線에서

Time after heaters on (min.)	Temperature of Water Moderator(°C)						Regulating Rod Position	Reactivity Change (¢)
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T _{av}		
0	17.5	17.7	17.7	17.6	17.9	17.7	385	0
20	18.1	18.1	18.0	18.8	18.1	18.1	385	0
50	18.8	18.9	18.6	18.8	18.8	18.8	388	0.20
110	20.2	20.0	20.0	20.0	20.2	20.1	390	0.48
140	20.7	20.6	20.4	20.5	20.9	20.6	391	0.52
175	21.6	21.6	21.2	21.2	21.5	21.4	395	0.90
200	22.2	22.2	21.7	21.8	22.0	22.0	395	0.90
230	22.7	22.8	22.2	22.3	22.4	22.5	396	0.99
260	23.4	23.4	23.0	23.0	23.1	23.2	399	1.28
290	23.9	24.2	23.5	23.6	23.8	23.8	399	1.28
320	24.4	24.8	24.3	24.4	24.5	24.5	402	1.48
350	25.0	25.8	24.6	25.0	25.2	25.1	404	1.65
410	25.8	26.8	25.4	26.0	26.2	26.0	407	1.90
470	26.7	27.8	26.7	27.2	27.2	27.1	410	2.20
530	27.0	27.9	28.0	28.3	28.3	28.1	414	2.45
590	29.3	29.9	29.1	29.4	29.5	29.4	417	2.77
650	30.4	30.9	30.3	30.4	30.6	30.5	421	3.27
710	31.5	31.8	31.3	31.5	31.6	31.5	423	3.57
770	32.6	32.9	32.3	32.5	32.3	32.5	428	3.95

* Remarks: 1. Criticality at zero power(1 watt). 2. Safety rod up, shim rod 530 position.

(表 1) 溫度變化에 따른 Regulating rod position 및 Reactivity change

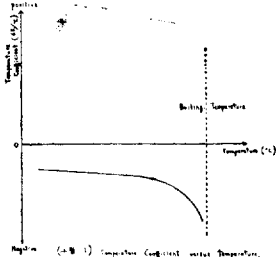
反應度の 變化量으로 直接 判讀되며 同 表 1에 依하여 減速材 溫度와 反應度와의 關係를 그림 8에 보인다.

本 實驗에서 TRIGA [MARK-II의 Overall temperature coefficient는 대략 溫度의 一次 函數的 關係가 있으며 그 값은 平均의으로 17.6~32.5°C의 溫度 範圍 內에서 -0.267¢/°C이다. TRIGA MARK-II는 核 物理 및 核工學 徒를 爲한 初步的 訓練과 研究를 目的으로 設計 製作된 것인바 이 系統은 모든 出力 準位(power level)에서 負의 溫度係數를 가지며 따라서 爐는 最大의 安定性을 갖는다.

本 實驗에서는 核燃料의 被襲材인 알미늄의 危弱性으로 因하여 보다 高溫에서의 反應度 變化量을 實測할 수 없었음이 유감이나 沸騰 以下の 溫度에서는 대략 上記의 值보다 그 絕對量이 過大하지 않을것으로 推察된다.

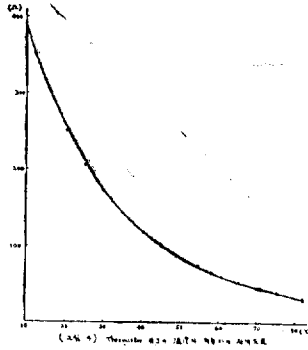
參 考 文 獻

- 1) R.L. Murray; Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Inc., 1961(4th printing) P 174~P 176.
- 2) M A. Schultz; Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1961. P 136~137.
- 3) S. Glasstone & M.C. Edlund; The Elements of Nuclear Reactor Theory, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, N.J. 1952. P 339~P 343.
- 4) M.W. Hulin & J. Beall; "Preliminary Results of the SNAP 2 Experimental Reactor", NAA-SR 5991(April (1961))
- 5) J. Miller & R.L. Brehm; "Temperature Coefficients and Spectra in the Hydride Moderated SNAP Reactors", NAA-SR-7140, (June 1961)
- 6) D.A. Daavettila; "Temperature Coefficients of Reactivity, Argonaut Reactor", (1965)
- 7) F.J. Jankowski, Pt al; "Calibration of Control Rods", from "Nuclear Science and Engineering", Vol. 2 No. 3 P 288.
- 8) R. Siegel & H. Hurwitz, Jr.; "The effect of Positive Temperature Coefficient on Reactor Stability and Reactor Transfer Function", KAPL-1138, 1955.



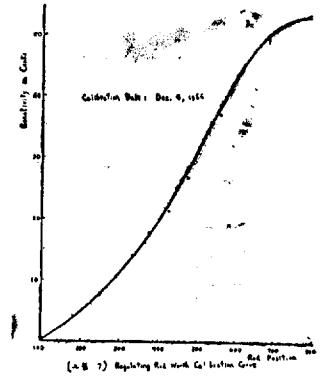
(그림 1) Temperature Coefficient versus Temperature, Cu^{++} para-potential with saturated calomel

그림 1



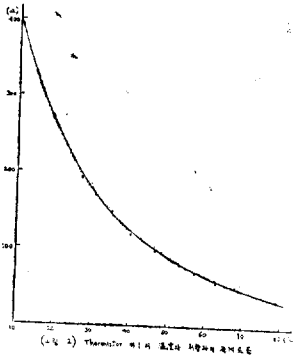
(그림 4) Theoretical EMF with saturated calomel

그림 4



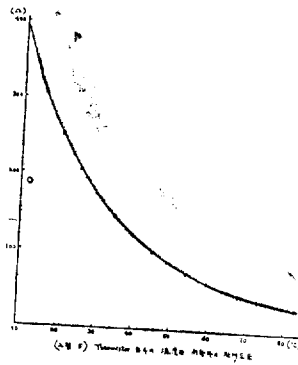
(그림 7) Repeating EMF with Calomel Electrode

그림 7



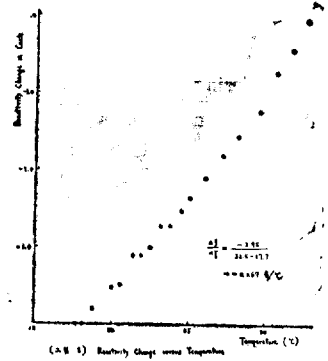
(그림 2) Theoretical EMF with saturated calomel

그림 2



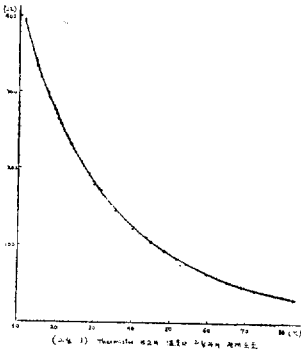
(그림 5) Theoretical EMF with saturated calomel

그림 5



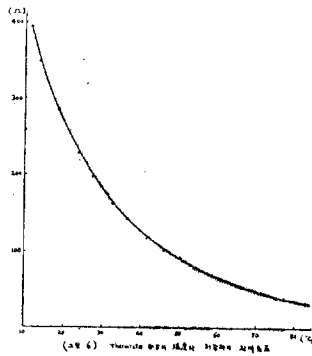
(그림 8) EMF Change versus Temperature

그림 8



(그림 3) Theoretical EMF with saturated calomel

그림 3



(그림 6) Theoretical EMF with saturated calomel

그림 6

(1967年 1月 7日 接受)