

針對土壤之腐蝕性對現有低壓瓦斯管做電氣防蝕設計

李 肇 祚譯

東京瓦斯：足立・古畑 原著

1. 前言

1955 ~ 1965 年代之經濟高成長期所大量埋設之瓦斯低壓管綫未採用像現在所使用之塑膠被覆鋼管那麼高水準之防蝕措施，經過這幾十年來，其防腐蝕性能將會逐漸降低。對這些早期埋設之瓦斯管，以長期觀點而言應儘早設法提高安全水準，減低維修費用使鋼管之壽命更加延長。

所謂要控制瓦斯管之腐蝕方法，首先就會想到具有 50 多年實績之電氣防蝕法，不過此法應用於現有低壓瓦斯管系之實例却很少。這是起因於過去未能明確指出在那一種狀況下就可認為達到防蝕目的。一比如說現在世界上被視為最具權威之 NACE Stand-

ard RP-01-69 亦僅說明以適宜選擇為前提將評估標準劃分為五個區分。此外電氣防蝕施工之主要對象為長大管路之電蝕（即由直流電車軌道漏逸出電流所造成之腐蝕），所需設備至為龐大且設計、施工、維護管理等相當複雜，有此二種原因對已設之低壓瓦斯管實施的較少。

為此針對土壤之腐蝕性要建立一套陰極防蝕之評估標準，能選擇必需而最小限度之防蝕設備之設計方式，且施工簡便成本較低之電氣防蝕標準施工法是必需的，作者就有關這一問題曾做過一系列之檢討，最近大約得到若干成果。以電氣化學反應做背景建立一種電氣防蝕設計方式，並且對既設之瀝青麻布包紮之支管及鍍鋅鋼

表 1 土壤特性值和陰極防蝕達成條件之關係

No	土 質	土 壤 特 性 值		陰 極 防 蝕 達 成 條 件		
		土壤比抵抗 ρ ($\Omega \text{ cm}$)	腐蝕電位 E_{corr} [mV Cu-] [CuSO ₄]	所需電位 Shift 量 $E_{\text{corr}}-E_a$ (mV)	達成電位 E_a [mV Cu-] [CuSO ₄]	所需電流 密度 i_p [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
1.	砂質 Loam	475	- 822	37	- 859	73
2.	Loam	980	- 720	56	- 776	21
3.	粘土質 Loam	1,010	- 795	16	- 811	36
4.	粘 土	1,400	- 798	67	- 865	24
5.	粘 土	1,900	- 727	15	- 742	15
6.	粘土質 Loam	2,000	- 707	30	- 737	17
7.	土 丹	2,200	- 790	21	- 811	18
8.	Silt 質粘土 (有機質土)	2,300	- 765	31	- 796	16
9.	土 丹	2,400	- 750	10	- 760	10
10.	Silt 質 Loam	3,300	- 669	17	- 686	10
11.	粘 土	4,000	- 772	41	- 813	7
12.	粘 土	4,200	- 750	16	- 766	8
13.	砂	7,500	- 518	15	- 533	0.8
14.	砂 質	12,000	- 632	22	- 674	5.4
15.	砂	25,000	- 556	30	- 586	2.2
16.	砂	26,000	- 615	13	- 628	1.7
17.	砂	82,000	- 358	37	- 395	0.3

管能延長其壽命之標準電氣防蝕施工法作一簡介。

2. 評估陰極防蝕效果標準之策劃：

(1) 土壤特性值和陰極防蝕效果達成條件之關係：

將東京瓦斯公司供應區域中之土質劃分為17種型類，用30×20mm鋼料試片埋在此17種土壤中測定腐蝕電位及土壤比電阻等土壤特性值然後用Pearson方法求能達到陰極防蝕電位及所需防蝕電流密度，結果如表-1。由這表可以看出各項事實。

① 以往一般所採用之-850mV作為評估之標準（即將埋設管之電位保持對Cu-CuSO₄電極電位較低-850mV，就能達到陰極防蝕之目的。）一律以此值為目標之防蝕設計對腐蝕性較強之粘土質土壤（例如No. 1. 4.）則防蝕不夠，而另一方面對腐蝕性較低之砂質土壤則可能有防蝕過剩。

② 如圖-1所示比電阻愈低，即腐蝕性愈強之土壤，其所需要達成陰極防蝕效果之電流密度是愈大。土壤比電阻和達成陰極防蝕效果之電流密度之關係可用下列公式來表示

$$i_p = \frac{33}{\rho} \dots\dots(1) \text{ 能達成陰極}$$

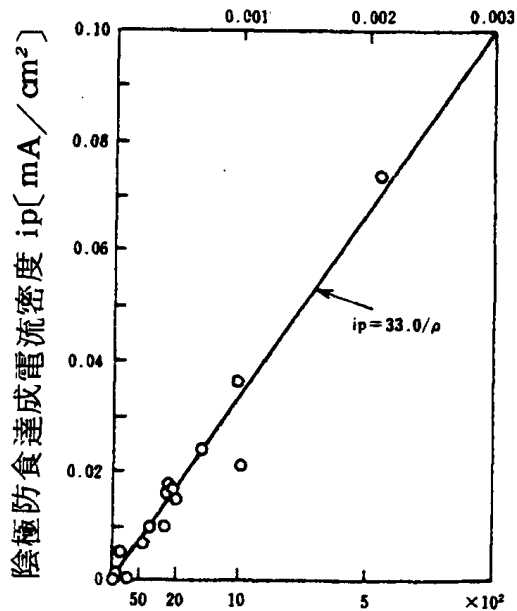
防蝕效果之電流密度 (mA/cm²)

ρ : 土壤比電阻 (Ω·cm)

(2) 包紮缺陷部之電流漏洩電阻：

埋設在比電阻 ρ 之土壤中之鋼管其包紮厚度 t 之包紮部所存在之平面包紮缺陷之曝露面積 S_j 是和同面積之具電氣性質之半球面包紮缺陷等價，而其洩漏電阻 R_j 可用下列公式來表示。

$$R_j = \left(\frac{t}{S_j} + \frac{1}{\sqrt{2\pi S_j}} \right) \dots\dots(2)(\Omega)$$



土壤比抵抗 ρ (Ω cm) 比電阻

圖 1 陰極防蝕達成電流密度和土壤比電阻之關係

R_j : 包紮缺陷部之洩漏電阻 (對無限遠大地之電阻) (Ω)

S_j : 包紮缺陷部之面積 (cm²),

t : 包紮部之厚度 (cm)

(3) 腐蝕電位和土壤比電阻之關係：

使用土壤環境測定裝置在埋有瓦斯管之屋外 500 處地方測量土壤之比電阻和鋼之腐蝕電位之結果兩者之間約有下列公式之關係存在。即

$$E_{corr} = 116 \log \rho - 1153 \dots\dots(3)$$

ρ : 土壤比電阻 (Ω·cm)

E_{corr} = 土壤中鋼腐蝕電位

(mV) 對 Cu-CuSO₄ 電極

(4) 陰極防蝕評估之公式化：

設陰極防蝕效果評估標準之定義為：流進包紮缺陷部之防電流密度必須超過當防蝕電流通電後應具有公式(1)規定之能達成陰極防蝕電流密度以上才可；按照這一定義，

$$i_j \geq i_p = \frac{330}{\rho} \dots\dots(4)$$

i_j : 表示當防蝕電流通電後之缺陷部之防蝕電流密度 (mA/cm²)

可是實際上在埋於地下之包紮鋼管有各種大小之缺陷分散在很多地方且亦處在裸露狀態。在這樣情況之下對所有的缺陷要施予同樣水準之電流密度，理論上幾乎不可能，那麼可用對全部包紮部缺陷能共同控制之唯一媒介變數—管對地電位（即次無限遠之大地為基準之地下管綫電位）和個別包紮部缺陷之防蝕電流密度之關係來替代之。假設可以勿視當防蝕電流流進時所引起之陰分極（註）即接通防蝕電流直後之狀態下，曝露在土壤中面積 S_j 之腐蝕電位 E_{corr} ，有洩漏電阻 R_j 之包紮缺陷所流進之電流密度 i_j ，管對地之電位 E_{on} 時有

$$i_j = \frac{E_{corr} - E_{on}}{R_j \times S_j} \dots\dots(5)\text{之關係}$$

（註）陰分極就是鋼和土壤界面之間，包紮缺陷部之電位會緩慢地移向低電位之現象。

E_{on} ：接通防蝕電流後之管對地電位（mV, vs Cu—CuSO₄）將公式(2)代入(5)式之

$$i_j = \frac{E_{corr} - E_{on}}{\rho \left(t + \sqrt{\frac{S_j}{2\pi}} \right)} \dots\dots(6)$$

將(4)代入(6)式，則評估標準之公式變成

$$E_{on} \leq E_{corr} - 330 \left\{ t + \sqrt{\frac{S_j}{2\pi}} \right\} \dots\dots(7)$$

腐蝕電位 E_{corr} 之公式(3)是土壤比電阻 ρ 之函數，將此代進(7)則

$$E_{on} \leq 116 \log \rho - 1153 - 330 \left(t + \sqrt{\frac{S_j}{2\pi}} \right) \dots\dots(8)$$

實際做地下管綫陰極防蝕設計時在(7)，(8)公式中之包紮缺陷面積 S_j

應採用可想到之最大缺陷面積，不過互相很靠近之多數包紮缺陷則有互相阻碍防蝕電流之流進，因此這種情形可視做一只缺陷處理。

3.設計用理論公式

(1)鎂陽極防蝕效果之推算公式

設管對地電位 E_{off} ，接地電阻 R_{pipe} 之地下埋設管以陽極電位 E_{Mg} ，併聯總接地電阻 $M_{Mg(n)}$ 之鎂陽極 n 支作防蝕時所發生之防蝕電流 I_{total} 是，

$$I_{total} = \frac{E_{off} - E_{Mg}}{R_{pipe} + R_{Mg(n)}} \dots\dots(9)$$

I_{total} ： n 只鎂陽極所發生之防蝕電流（mA）

E_{off} ：防蝕電流通電前管對地之電位（mV）vs Cu—CuSO₄ 電極

E_{Mg} ：鎂陽極對地電位（mV vs Cu·CuSO₄ 電極）

R_{pipe} ：埋在地下鋼管之接地電阻（Ω）

$R_{Mg(n)}$ ： n 只鎂陽極之接地電阻（Ω）

防蝕電流通電後立刻測量管對地電位可由下列公式表示

$$E_{on} = E_{off} - I_{total} \times R_{pipe} = E_{off} - \frac{(E_{off} - E_{Mg}) R_{pipe}}{R_{pipe} + R_{Mg(n)}} \dots\dots(10)$$

鎂陽極單只之接地電阻是 R_{Mg}

$$R_{Mg} = \phi \cdot \rho \dots\dots(11)$$

R_{Mg} ：鎂陽極單只之接地電阻（Ω）

ρ ：土壤比電阻（Ω·cm）

ϕ ：鎂陽極之形狀係數（cm）

將此鎂陽極用 n 只併聯連接時總電阻就成為

$$R_{Mg(n)} = R \frac{R_{Mg}}{n} = R \cdot \phi \cdot \rho / n \dots\dots(12)$$

R：鎂陽極之配置係數（需要在現場實測）

另一方面防蝕對象之埋設管接地電阻 $R_{p'pe}$ 以假設包紮施工部劣化程度之指數 Ψ ，則

$$R_{p'pe} = \frac{\Psi \cdot \rho}{S_{p'pe}} \dots\dots\dots(13)$$

Ψ ：包紮部劣化指數 (cm)

$S_{p'pe}$ ：防蝕對象埋設管表面積 (cm²)

將(12)、(13)代入(10)式後鎂陽極防蝕效果之推算公式如下：

$$E_{on} = E_{off} - \frac{E_{off} - E_{Mg}}{\frac{k \cdot \phi \cdot S_{p'pe}}{n \Psi} + 1} \dots\dots\dots(14)$$

(2)陰極防蝕設計公式

將防蝕效果推算公式(14)代入陰極防蝕評估公式(8)可求出要達到陰極防蝕效果之所需鎂陽極支數之公式。即

$$n \geq \frac{R \cdot \phi \cdot S_{p'pe} \{ E_{off} - 116 \log \rho \}}{\Psi \{ 116 \log \rho - 1153 - E_{Mg} + 1153 + 330(t + \sqrt{\frac{S_j}{2\pi}}) \}} - 330 \left(t + \frac{\sqrt{S_j}}{\sqrt{2\pi}} \right) \dots\dots(15)$$

上述公式中有關鎂陽極對地電位 E_{Mg} ，鎂陽極之形狀係數 ϕ ，鎂陽極之配置係數 R，包紮劣化指數 Ψ ，包紮厚度 t，包紮缺陷最大面積 S_j 等數據必須預先查明。防蝕對象之埋設管表面積 $S_{p'pe}$ 則可由管外徑及長度計算之。因此如果事先能測定土壤比電阻 ρ 及管對地電位 E_{off} ，就可以進行需氣防蝕之設計。

(3)鎂陽極容量之估算公式

一只鎂陽極之發生電流是按公式(9)算出之總發生電流量除以裝置支數

n 所得數值，就是如下

$$I_{Mg} = \frac{E_{off} - E_{Mg}}{n (R_{p'pe} + R_{Mg}(n))} \dots\dots(16)$$

I_{Mg} ：是鎂陽極一只所發生之防蝕電流 (mA)

因此希望防蝕效果能維持 Y 年所需之鎂陽極之容量 Q (mA · Y) 是

$$Q \geq I_{Mg} \cdot Y = \frac{(E_{off} - E_{Mg}) S_{p'pe} \times Y}{(n \cdot \Psi + k \phi \cdot S_{p'pe}) \times \rho} \text{ (mA} \times Y \text{)} \dots\dots\dots(17)$$

4.由現場測試求取各項係數之定量化

(1)鎂陽極之對地電位

將填有 Backfill (以石膏、Bentnite、芒硝等粉末混合物) 之鎂陽極包 106 只埋設於土壤中，實測對電位 E_{Mg} ，結果實測值約分佈在 -1448 mV 至 -1651 mV 之間，平均值為 -1542 mV，標準偏差是 41 mV，供設計用之數值採用

$$E_{Mg} = -1500 \text{ (mV)}$$

(2)鎂陽極形狀係數

據 Peabody 之發表，長度 L cm，直徑 d cm 之圓筒狀 Backfill 中裝入之鎂陽極之形狀係數可用下列公式表示：

$$\phi' = \frac{1}{2\pi L} \left(2 \cdot 3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right) \dots\dots\dots(19)$$

設 L = 100 cm，d = 20 cm 時之

$$\phi' = 0.0043 \dots\dots\dots(20)$$

圖 - 2 是埋設後經過 1 星期及 1 ~ 2 個月以後鎂陽極之接地電阻 R_{Mg} 和土壤比電阻 ρ ($\Omega \cdot cm$) 之關係用圖表表示。

點綫部份是相當於 $R_{Mg} = 0.0043 \rho$ 之直綫。實綫部份是埋設後經過 1 星期之實測數值用最小二乘法算出實驗公式成爲由原點出發之直綫而實驗式是 $R_{Mg} = 0.0023 \rho$ 。由此實

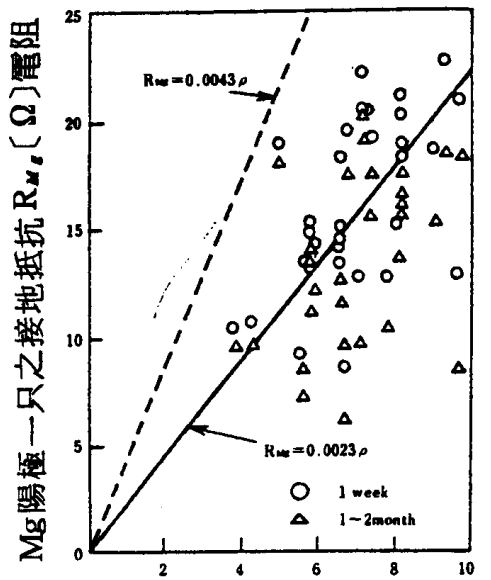


圖 2 Mg 陽極之接地電阻和土壤比電之關係

驗得知所有實驗值均散在點綫下面部位屬於較低電阻，所以採用公式(20)計算可謂相當安全。但是經過 1 ~ 2 個月以後實測值之 90% 都點在實綫下側而這次檢討之目的是要追求經濟性為優先，所以鎂陽極之形狀係數則決定採用下列數值。即 $\phi = 0.0023$

(3) 鎂陽極之配置係數

將長度 L cm，直徑 d cm 有 Backfill 填包之鎂陽極 n 支以間隔 S cm 距離平行安放時之

$$R_{Mg(n)} = \frac{\rho}{2\pi L \cdot n} \left(2.3 \log \frac{8L}{d} \right)$$

$$- 1 + \frac{4.6 L}{S} \log 0.655 n) \dots (22)$$

同樣將上述鎂陽極 n 只串聯安放成一列時之 $R_{Mg(n)}$ 為

$$R_{Mg(n)} = \frac{\rho}{2\pi L \cdot n} \left(2.3 \log \frac{8L \cdot n}{d} - 1 \right) \dots (23)$$

用(22)，(23)公式大概可以推算鎂陽極之接地電阻。就 $L = 100$ cm， $d = 20$ cm 之鎂陽極用(17)，(22)，(23)式計算鎂陽極之配置係數 R 和實測值作一比較如表 - 2。

參考上表結果可以挑出能供實際應用之三種配置方式之型態決定配置係數 R 如下

型態 (I)：一個控坑埋設一只鎂陽極 $R = 1.0$

型態 (II)：一個控坑內埋放鎂陽極二只而以間隔 100 cm 距離平行安放 $R = 1.19$

型態 (III)：一個控坑內埋設二只陽極並以間隔 50 cm 距離平行安放 $R = 1.39$ (24)

(4) 包紮劣化指數：

圖 - 3 是自 1950 ~ 1963 年間所埋設之 50 A 瀝青麻布包紮之支管 10 支，實地測量其單位面積之漏洩電

表 - 2 鎂陽極配置係數之計算值和實測值之關係

配置方式	一只挖掘坑內安放鎂陽極之支數	鎂陽極安放間隔 S (cm)	鎂陽極配置係數 R	
			計算值	實測值
平行配置法	2	20	1.99	1.63
	2	50	1.39	1.37
	2	100	1.19	1.18
	3	50	1.99	1.82
串聯配置	2	-	1.25	1.36

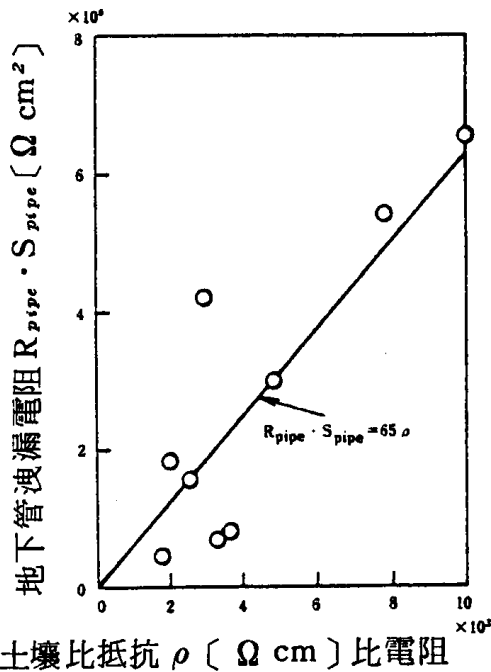


圖 3 瀝青麻布包紮鋼管洩漏電阻和土壤比電阻之關係

阻值 $R_{pipe} \times S_{pipe}$ 和土壤比電阻之相關關係圖，由此結果包紮劣化指數 Ψ 採用 65。

(5) 最大包紮缺陷面積 (Sj)

對瀝青麻布包紮支管六支按每根管綫調查包紮部之最大缺陷面積結果大約分佈在 $1.8 \sim 8.8 \text{ cm}^2$ 。因此

Sj 採用為 $10 (\text{cm}^2)$

5. 對已埋設之瀝青麻布包紮支管之應用從基礎實驗開始，引導出設計理論公式，經現場實驗找出各項係數這一連串作業後，奠定對已埋設低壓瓦斯管用陰極防蝕路計之方案，之後對本設計方案加上若干安全係數作模擬計算使作業能更簡化，為要減低施工成本以及設計、施工、維護管理之方便，對全長六 Km 之瀝青麻布包紮之支管作實地測試結果如表-3 及圖-4 之標準施工法現已由東京瓦斯建立起來。

註 NO-BLOW 絕緣接頭之構造：

如圖-5 所示這種絕緣接頭是分割成上下兩半具有極高之氣密性及耐位置變動性（例如地盤下陷等）如圖-5。

6. 結言

本防蝕施工法自 1985 年起對延長 40 公里之瀝青麻布包紮之既設支管施工後獲得良好效果。本文對今後之防蝕技術料必有諸多可參考之處。

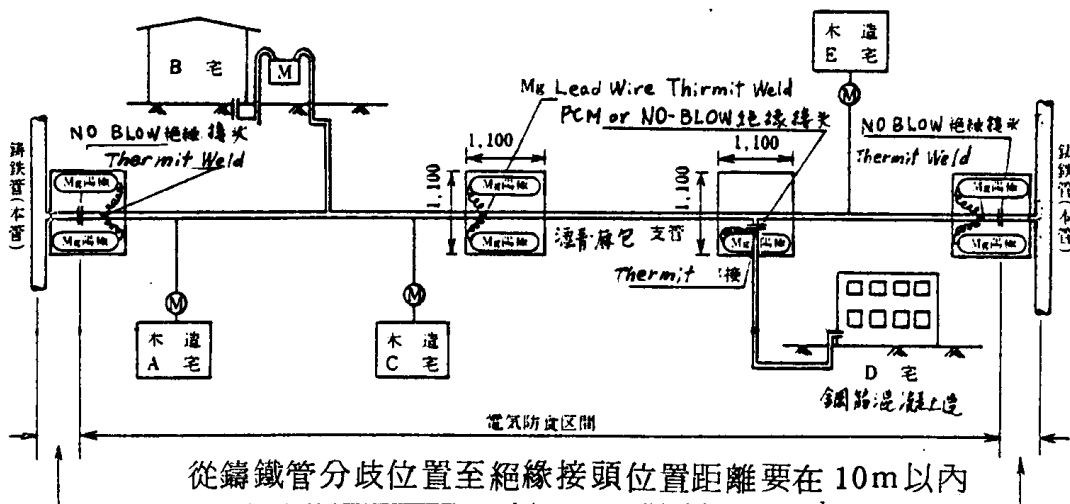


圖 4 瀝青麻布包紮支管之電氣防蝕施工方法之概念圖

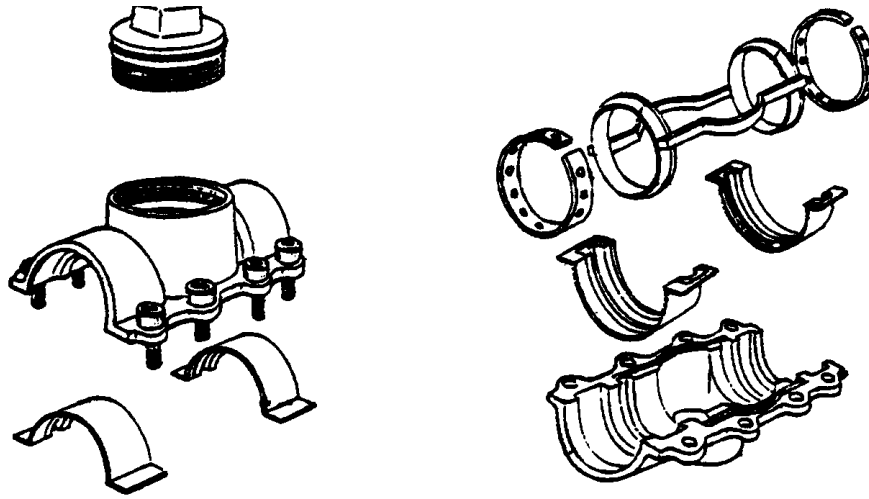


圖 5 NO-BLOW 絕緣接頭之構造

表-3 電氣防蝕工程標準施工法

項 目	內 容	備 註	
基 本 事 項	劃定防蝕區域	將鑄鐵本管、PLP 支管等防蝕對象以外之管綫之界綫處插入絕緣接頭，使要施予電氣防蝕之支管成爲獨立之區域（絕緣接頭要裝在瀝青麻布包紮支管之這邊）	
	確定供應管內管（錶內外管）之防蝕範圍	<ul style="list-style-type: none"> ①一般木造房屋之供應管，應將錶內管亦包含在支管防蝕之範圍內。 ②鋼筋混凝土造房屋之供應管用戶管。 ●用戶管中錶外管和錶內管在建築物外邊立上部位已經施有絕緣者，在絕緣部上游之供應管及錶內外管均應包含在支管防蝕區域內。 ●在建築物外側立上部未施予絕緣在應在支管接出部位施予絕緣而將供應支管、用戶管與支管隔離，施予防蝕施工。 	●一般木造房屋所裝瓦斯錶接頭未施予絕緣
	裝接鎂陽極導電綫之方法	●不另接出測定防蝕效果以及流通防蝕電流兼用之導電綫立上接頭及裝設端子箱，而僅將鎂陽極導電綫在地下直接裝接於支管上。	●採用鋁熱熔劑（Thermit）熔接法施工
	管對地電位之測定法	●利用錶內外管立上部做測量防蝕效果。	
使用材料	<ul style="list-style-type: none"> ①支管部：絕緣接頭（NOBLOW）（註）... 80A, 50A, 40A ②用戶錶內管：絕緣接頭（NOBLOW）80A, 50A, 40A PCM 絕緣接頭 32A, 25A, 20A 		

	鎂陽極	<ul style="list-style-type: none"> ● 17 S型 (Backfill 100 cm₁ × 20_a 陽極容量1000 mA · Yr) 	預定耐用壽命20年
設計 施工 標準	安裝絕緣接頭	<ul style="list-style-type: none"> ①支管部：和鑄鐵本管分歧出之部位 (10 m以內) ：和 PLP 管接連部位。支管防蝕區域分界點。 ②用戶管：由建築物立上部未施予絕緣者為限 (建築物為鋼筋混凝土) ：由供應管接出部位 	一處防蝕區域之總延長以 300 m 為標準
	鎂陽極之安裝	<ul style="list-style-type: none"> ①鎂陽極安裝方法：對支管部，每一地點安裝 2 只陽極，以平排間隔 50 cm 或串聯配置法安裝。 ● 由支管分歧接出之用戶管則安裝 1 只 ②一處裝設鎂陽極二只之能防蝕支管之延長為 80 A : 30 m 50 A, 40 A : 40 m ③鎂陽之安裝位置，對支管、用戶管均須針對絕緣部優先配置，剩下的陽極視需要量沿支管均勻分配每處 2 只 	鎂陽極之周圍要回填原控出之土壤
測量 評估 標準	測量土壤比電阻	<ul style="list-style-type: none"> ● 對每一處挖堀坑要測量土壤比電阻，算出防蝕區域 (路綫) 之土壤比電阻平均值 $\bar{\rho}$ 	
	測量管對地電位防蝕效果之測定	<ul style="list-style-type: none"> ● 利用錶內、外管之立上白鐵管做為替代端子。 ● 測量地點要選在鎂陽極安裝處之中間地點，但末端部前方未裝有鎂陽極之分歧部位則在此先端部處附近測量 ● 對每一防蝕區域 (管綫) 算出防蝕電位平均值 $\overline{E_{on}}$ 	● 管對地電位之測定要在施工後一個月以後做
	評估	<ul style="list-style-type: none"> ● 每一防蝕區域之 $\overline{E_{on}}$ 合格基準 $\overline{E_{on}} < \overline{E_{corr}} - 50 \text{ mV}$, 但 $\overline{E_{corr}} = 116 \log \bar{\rho} - 1153$ ● 如果有某一防蝕區域之 $\overline{E_{on}}$ 未達到上述基準時，施工後亦不馬上做改善作業，經一段定期檢查所測得數值後視必要才做改善工作 	
	維護管理標準	<ul style="list-style-type: none"> ● 定期做管對地電位測量，每年要做 3 次以上 ● 定期管綫檢查結果發現有顯著之電位不良 (即 -600 mV 以上) 之管綫要施予改善措施 ● 如果對已施予電氣防蝕之管綫做抽換修理時，應注意勿使管綫有被分隔，應接上導電綫使電流 (防蝕) 能暢通 	<ul style="list-style-type: none"> ● 改善施工法：支管綫上途中如有絕緣，應予導電化 ● 追加安裝鎂陽極數量 ● 在瓦斯錶處裝絕緣等