

土研新技術ショーケース 2014 in 沖縄

University of Ryukyus

# 沖縄における橋梁の長寿命化戦略 ～鋼橋の新防食技術への挑戦～

琉球大学 工学部環境建設工学科  
土木工学専攻  
下里 哲弘

University of Ryukyus

## 講演プログラム

§ 1: 沖縄の腐食環境と塩害腐食橋梁の実態  
～腐食促進島の沖縄～

§ 2: 失敗から学ぶ鋼橋の長寿命化スキル  
～腐食により崩落した辺野喜橋からの知見～

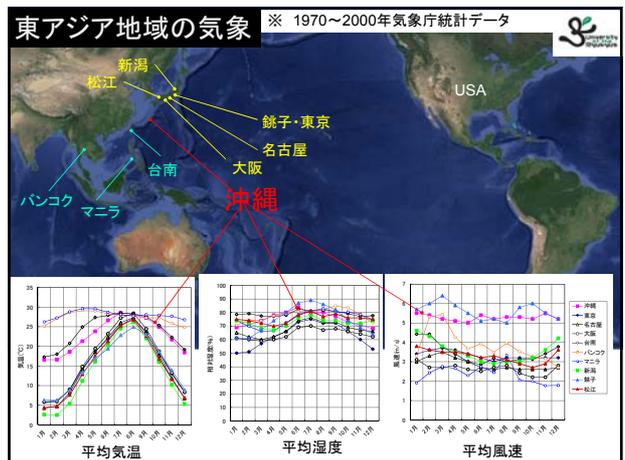
§ 3: 亜熱帯海洋環境での新防食技術への挑戦  
～高耐食材料の開発と  
IRABU Steel Bridgeでのチャレンジ～

土研新技術ショーケース 2014 in 沖縄

University of Ryukyus

## § 1: 沖縄の腐食環境と塩害腐食橋梁の実態 ～腐食促進島の沖縄～

- ・沖縄は腐食促進島？
- ・What is the enemy?
- What is a target?



## 腐食速度・環境調査

腐食速度MAP

約110km

沖繩本島(14地点)  
久米島(2地点)  
宮古島(1地点) 計17地点

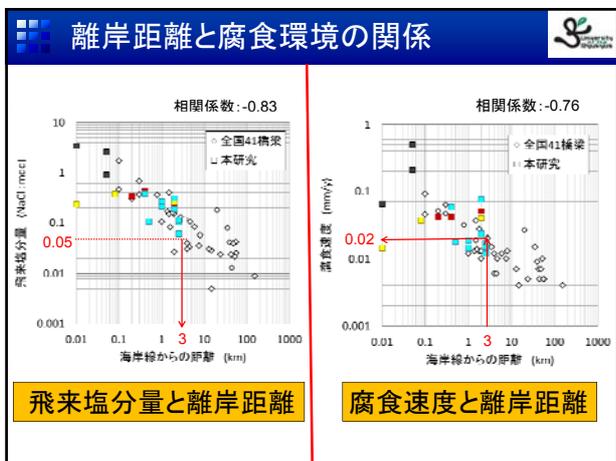
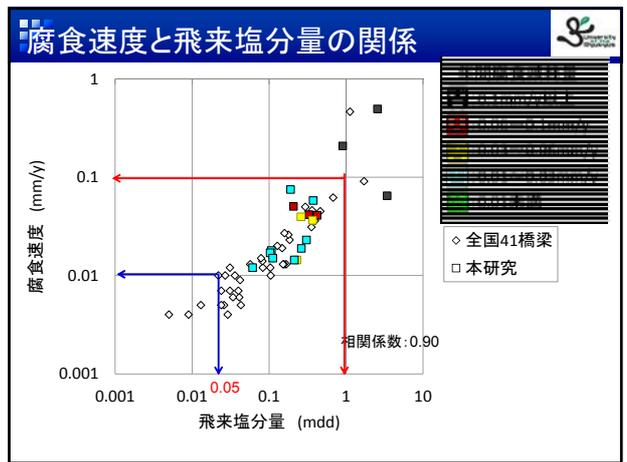
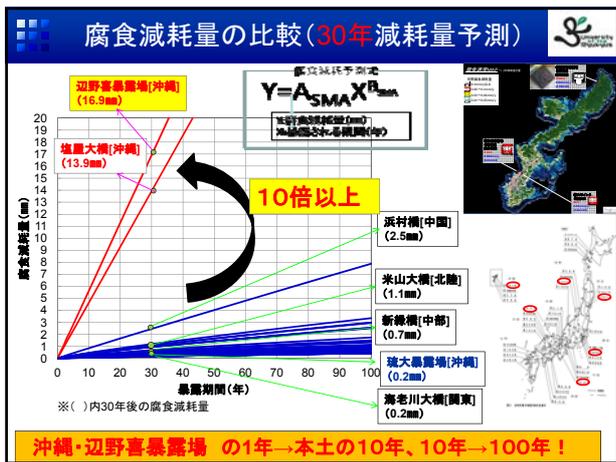
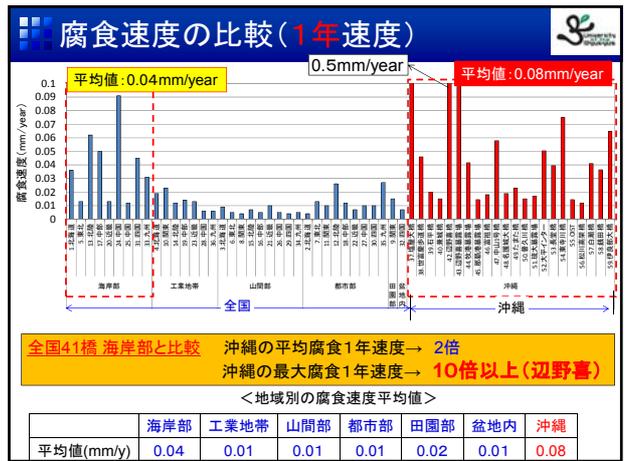
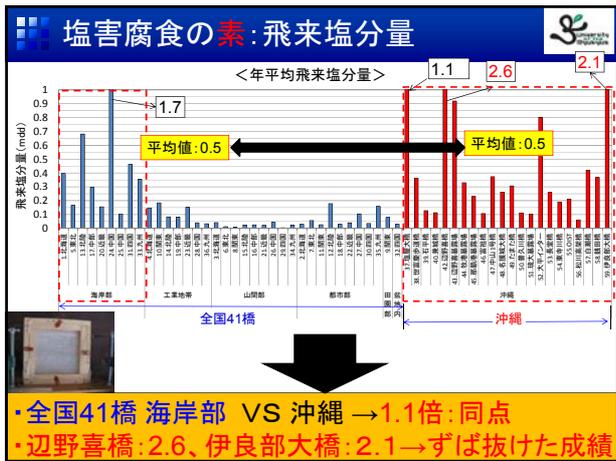
＜実橋・暴露場での調査状況＞

ドライゲージ法 (JIS Z 2382) 耐候性鋼板センサ

● JIS SMA鋼 ● サイズ 50×50×3mm

煮沸 硝酸銀滴定法 酸洗法: 減重量計測





**腐食鋼橋の事例：腐食度** ☹️☹️  $0.06 \sim 0.1 \text{mm/y}$

1970年建設(43年経過)  
 <琉球政府時代の建設>

断面図

12

**腐食鋼橋の事例(沖縄)：腐食度** ☹️☹️  $0.03 \sim 0.06 \text{mm/y}$

桁尻部の腐食

桁端部の腐食

点検通路の腐食

13

**無塗装の耐候性鋼橋(in 沖縄)**

① 普久川橋(河川上)

- 平均飛来塩分量:  $0.10 \text{mdd}$
- 腐食速度:  $0.03 \sim 0.06 \text{mm/y}$

断面図

- ◇竣工1984年(29年経過)
- ◇離岸距離0.6km、河川上
- ◇1径間3主桁、橋長32m

腐食度  $0.03 \sim 0.06 \text{mm/y}$

さび厚:  $205.7 \mu\text{m}$   
 目視評点: 4 (正常)

14

**無塗装の耐候性鋼橋(in 沖縄)**

② 松川高架橋(市街地)

- 平均飛来塩分量:  $0.05 \text{mdd}$
- 腐食速度:  $0.01 \sim 0.03 \text{mm/y}$

断面図

- ◇竣工1980年(33年経過)
- ◇離岸距離2.5km、市街地
- ◇4径間5主桁、橋長80m

腐食度  $0.01 \sim 0.03 \text{mm/y}$

さび評点: 5 (正常)

15

**塩害RC橋の事例(沖縄) 腐食度  $0.1 \text{mm/y}$ 以上**

**崩落したRC橋の事例：原因は管理不自覚**

★これが日本の維持管理の実態？  
 ⇒管理実態なし。  
 ⇒水管のメンテ時に発見機会あり？

崩落事故の原因  
 ⇒橋の管理者としての不自覚

★主鉄筋破断！崩落原因  
 ⇒RC構造として不成立。

16

**塩害RC橋の事例(沖縄)：腐食度  $0.03 \sim 0.06 \text{mm/y}$**

崩落直前のBOXカルバートの事例：原因はノーメンテナンス

<コンクリート剥落、中柱せん断破壊？> <鉄筋切断！⇒崩落の危険性大>

鉄筋破断、中柱の破壊 ⇒ 専門技術者の点検で発見⇒通行止め

17

塩害RC橋の事例(沖縄): 腐食度 0.03~0.06mm/y

- RC橋の激しい塩害
- 原因? 材料仕様? 施工品質?



腐食鋼橋の事例(沖縄) 腐食度 0.1mm/y以上

- ◆1981年建設、橋長35m
- ◆鋼単純合成桁橋(3主桁・RC床版)。
- ◆無塗装仕様の耐候性鋼橋。
- ★約50mの離岸距離 2~3mdd(NaCl)



桁端部の腐食破断



橋梁内部の激しい塩害劣化



桁端部の破断、座屈

腐食により崩落に至った橋 2009年7月



腐食鋼橋の事例(沖縄) 腐食度 0.1mm/y以上



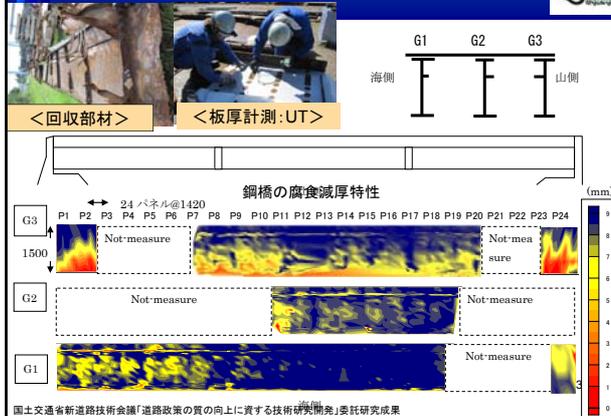
土研新技術ショーケース 2014 in 沖縄

§2: 失敗から学ぶ鋼橋の長寿命化スキル  
~ 腐食崩落した辺野喜橋からの知見 ~

鋼橋の維持管理の貴重な知見(宝)



腐食減厚特性 : ① 腐食マップ



### 腐食減厚特性 : ②桁中間部と桁端部

桁端部の腐食環境 >> 桁中間部の腐食環境

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食減厚特性 : ③桁端部

落下した錆片

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食減厚特性 : ⑤桁内と桁外(雨洗浄)

塩洗浄の効果大。点検重点箇所は桁内面。

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食減厚特性 : ⑥桁内の腐食と飛来塩特性

桁内には飛来塩分の流入と渦流的現象が生じる。

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 飛来塩分遮断対策

防護板は錆びなくて軽い材料  
・FRP製、アルミ製、チタン製

OIST(沖縄科学技術大学院大学)

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食鋼桁のせん断強度特性

Corroded Web

Specimen

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食鋼桁のせん断強度特性

<部分切断後の腐食桁>    <腐食実験桁>    <レーザ計測>

均一腐食 A	下部腐食 B	中央腐食 C1	中央腐食 C2
平均板厚 8.13mm	平均板厚 7.47mm	平均板厚 7.93mm	平均板厚 7.46mm

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食鋼桁のせん断強度特性

#### 実験方法

6000kN大型試験機(施工技術総合研究所)    変位計の設置状況

### 実験結果:せん断座屈強度

せん断座屈強度曲線

$V_{sp}/V_{sp,100\%}(t=0mm)$  vs  $t_1/t_0(mm)$

● 均一腐食 A    ● 下部腐食 B  
 ● 中央腐食 C1    ● 中央腐食 C2

<せん断座屈—平均板厚>

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

### 腐食高力ボルトの残存軸力評価

高力ボルト摩擦接合

### 腐食高力ボルトの残存軸力評価

プラスト処理    ノコ切断

一様型    砂時計型    台形型    逆台形型

### 腐食高力ボルトの残存軸力評価

#### ひずみゲージ法

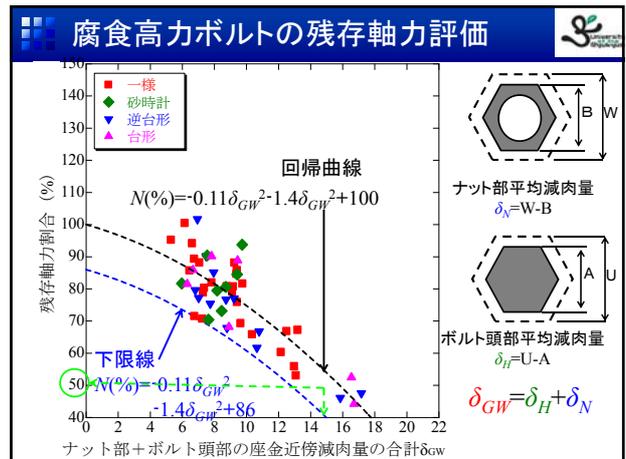
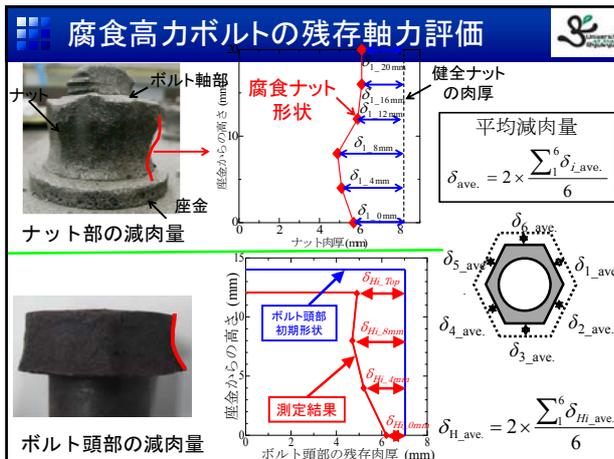
2軸ゲージ    ナットを緩める

軸力解放時の頭部ひずみを計測    解放ひずみの値となるまでボルトの締め付け

#### コア抜き

写真-2 コア抜き作業

ナットを緩めたり再び締め付けることは困難    ドリルを用いてコア抜きし、その際に解放されるひずみより軸力を推定



- ### まとめ: 長寿命化に対する鋼橋の強み
- 1、鋼橋の腐食の弱点は桁内端部と限定的である。  
★端部の防食のみで長寿命化が図れる。
  - 2、劣化過程と劣化部位がわかりやすい。  
★錆・腐食は表面から進行。  
→見える損傷・わかるダメージ度
  - 3、腐食鋼橋の残存耐荷力は算定可能である。  
★LCC思想は鋼橋にとって最大のチャンス

### 土研新技術ショーケース 2014 in 沖縄

## §3: 亜熱帯海洋環境での新防食技術への挑戦

- ★ 高耐食材料の開発へのチャレンジ
- ★ IRABU Steel Bridgeでのチャレンジ

- ### 沖縄での防食技術開発の戦略
- ①部材エッジ部の防食技術
    - ・2R加工基準の開発 (工場: 新設、現場: 塗替)
    - ・膜厚検査機器、方法の開発
  - ②ボルト添合部の防食技術
    - ・高耐食高力ボルトの開発
    - ・ボルトキャップの評価、開発
    - ・全断面溶接橋梁の適用検討
  - ③飛来塩分防護構造
    - ・防護板構造の開発
    - ・合理化橋梁形式の開発 (箱桁、2次部材の省略)
  - ④水洗い技術
    - ・水洗い機械の開発
    - ・試験施工 (効率化、汎用性、環境配慮)
  - ⑤桁端部の防食技術
    - ・非排水型伸縮装置の開発
    - ・排水構造の開発
    - ・支承構造の防食構造の開発
  - ⑥耐食性に優れた橋梁
    - ・ステンレス橋梁の開発、適用
    - ・金属溶射橋梁の開発、適用
    - ・新箱桁橋梁の開発、適用
- 沖縄地区鋼橋塗装マニュアル(平成20年8月)  
: 沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建設部監修



### 鋼橋におけるボルト部の錆・腐食

沖縄モノレールでの  
わずか数年での腐食実態

花咲くボルト

### ボルト部の錆び・腐食

**論点①:発錆原因は何か?**  
**現行仕様でOK?**  
 ⇒ 塗装仕様?(膜厚、耐紫外線等)  
 ⇒ 施工品質?(膜厚確保、付着性等)  
 ⇒ 沖縄の環境?(紫外線、塩分、湿気)  
 ⇒ ボルト添接構造?(角部、材質?)

**論点②:高耐久防錆技術とは?**  
 ⇒ 防錆・防食ボルトの開発状況  
 ⇒ 施工品質向上技術とは?

43

### 対策チャレンジ①:超々厚膜塗

沖縄版と塗装防食便覧(全国版)の高力ボルト接合部の塗装系比較

工程	新沖縄新設塗装系		便覧新設塗装系	
	塗料または素地調整	標準膜厚(μm)	塗料または素地調整	標準膜厚(μm)
素地調整	プラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	プラスト処理 ISO Sa2 1/2	—
防食下地	無機ジンクリッチペイント	75	無機ジンクリッチペイント	75
素地調整	動力工具 ISO St3	—	動力工具 ISO St3	—
ミストコート	変性エポキシ樹脂塗料下塗	—	変性エポキシ樹脂塗料下塗	—
下塗第1層	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	300	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	300
下塗第2層	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	300	—	—
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	30	ふっ素樹脂塗料用中塗	30
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	25	ふっ素樹脂塗料上塗	25

現場

沖縄マニュアル: 対策として厚膜塗装の採用

原因=膜厚不足? 対策=厚膜化?

44

### 対策チャレンジ①:超々厚膜塗装 NG

膜厚検証実験

沖縄版	膜厚(μm)	膜厚(μm)		
		実際	設計	差
1 上	30	25	5	
2 中	—	30	-30	
3 下2	52	300	-248	
4 下1	250	300	-50	

塗装・防食便覧(全国版)	膜厚(μm)	膜厚(μm)		
		実際	設計	差
1 上	26	25	1	
2 中	39	30	—	
3 下	72	300	-228	

45

### 沖縄都市モノレールでのチャレンジ

沖縄モノレールでの  
わずか数年での腐食実態

原因は何?  
対策は?

46

### 高力ボルトの腐食に対する最大の弱点

締付時の傷

傷からの錆

原因:①ボルト締付時の傷  
②ボルトのみ非重防食仕様。

【重防食】

対策:締付前の防食処理  
条件①:薄膜(50μm程度)  
条件②:犠牲防食仕様  
材料:Zn、Al、Mg etc  
処理:メッキ、溶射、SZ

締付時の傷

### 対策チャレンジ②:メッキボルト



**防錆処理ボルト**

- 下地処理+ウオッシュプライマー30μm
- 本締までの6か月~1年の期間有効
- 沖縄塗装マニュアルで規定(F10T仕様)



**熔融亜鉛メッキボルト**

- HDZ55(付着550g/m<sup>2</sup>)
- F8T仕様(道路橋示方書規定)

---



**高耐食性超力六角ボルト(12G55)**

- 55%アルミ・45%亜鉛合金
- F10T仕様対応



**SGメッキボルト**

- 5%Al-1%Mg-Zn(付着量は350g/m<sup>2</sup>以上)
- F8T仕様

48

### 対策チャレンジ②:メッキボルト 進行中

**塩水噴霧試験**  
・温度:35℃、5%食塩水噴霧



早期に腐食



600hで腐食

55%アルミ・45%亜鉛合金



1200hで腐食

SGメッキ5%Al-1%Mg-Zn



1600h:腐食なし

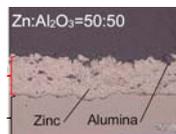
### 対策チャレンジ③:Smart ZIC工法

金属粉末を融点より低温で超音速で衝突させ、**圧着**させ皮膜層を生成する技術(Cold Spray):ロシア製

- 粒子の速度:300~1000m/s
- 粒子の最大温度:500℃
- 適用粉末材料:Cu, Zn, Ni, Ti, etc.




Zn:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=50:50




➢ ボルトのねじ山、角部に皮膜層を生成  
➢ アルミナの混入による**プラスト効果**

50

### 対策チャレンジ③:Smart ZIC工法

**SZ工法の現場試験施工**

平均飛来塩分量:0.11mdd <最大値:0.21mdd>	平均湿度:74.6% 平均温度:30.6℃
----------------------------------	--------------------------




<SZ工法施工状況>



51/51

### 対策チャレンジ③:Smart ZIC工法 進行中

**SZ工法の現場試験施工**

~施工前~



~施工後~



~7ヶ月後~



犠牲防食

---

~施工前~



~施工後~



~7ヶ月後~



犠牲防食

➢ 亜鉛皮膜の状態は**良好**  
➢ 一部亜鉛が白く反応し、犠牲防食効果を確認

52

### 沖縄都市モノレールでのチャレンジ

**フッ素樹脂上塗塗装のチョーキング:下塗りが露呈**



早期発生(10年程度)、原因は?

- ・本四架橋(孫崎高架橋での事例)
- ⇒11年経過のポリウレタン塗装とフッ素塗装の光沢度が同程度低下
- ・原因:白色の酸化チタン顔料(マンセル値N7.5)の光化学活性反応
- ・実験→チタン白顔料+高密度表面処理、紫外線吸収剤添加など
- 出典:2007年、Structure Painting Vol.35 No.1、テクニカルレポート「高耐久性ふっ素樹脂塗料の(仮称)の開発」

対策:管理者側の品質検査方法の構築(健全なる懐疑心)

## IRABU Steel Brigeでのチャレンジ

橋長：420.0m(120.0m+180.0m+120.0)

## IRABU Steel Brigeでのチャレンジ

- ①部材エッジ部の防食技術
  - ・3R加工基準の開発
  - ・吊金具省略構造の開発
- ②ボルト添合部の防食技術
  - ・膜厚検査機器、方法の開発
  - ・ボルトキャップの評価、開発
  - ・**全断面溶接橋梁**の適用検討
- ③飛来塩分防護構造
  - ・**防護板構造**の開発
  - ・合理化橋梁形式の開発 (箱桁、2次部材の省略)
- ④水洗い技術
  - ・水洗い機械の開発
  - ・**実橋での適用(橋梁点検車)**
- ⑤桁端部の防食技術
  - ・非排水型伸縮装置の開発
  - ・**排水構造の開発**
  - ・支承構造の防食構造の開発
- ⑥耐食性に優れた橋梁
  - ・ステンレス橋梁の開発、適用
  - ・**金属溶射橋梁**の開発、適用
  - ・**新箱桁橋梁**の開発、適用

沖縄地区鋼橋塗装マニュアル(平成20年8月)  
: 沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建設部監修

## IRABU Steel Brigeでのチャレンジ

伊良部大橋（沖縄県宮古島市）  
: 1ボックスの構造形式  
: 外面部は全溶接を採用  
: 吊金具省略⇒外面突起なし  
⇒**塗膜自体の寿命を100%期待**  
**100年耐久性鋼橋の誕生!!**

橋長：420.0m(120.0m+180.0m+120.0)

## IRABU Steel Brigeでのチャレンジ

一般外面仕様（伊良部大橋主航路部仕様）

塗装工程	塗料名	方法	標準使用量 (g/m <sup>2</sup> )	目標膜厚 (μm)	塗装間隔 <sup>①②</sup>	
製作工場	素地調整	製品プラスト処理 ISO Sa2.5以上 <sup>③④</sup>			4時間以内 <sup>⑤</sup> (2時間以内)	
	金属溶射 <sup>⑥⑦</sup>	アルミニウム(90%)・マグネシウム(5%)合金	プラズマ溶射	500	150以上	24時間以内
	封孔処理	金属溶射封孔処理剤	エアレス	200	—	16時間以上 7日以内
	下塗り	エポキシ樹脂 下塗	エアレス	540	120	16時間以上 10日以内
	中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	エアレス	170	30	1~10日
	上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	エアレス	140	25	

海上部での100年耐用仕様  
●防食下地：アルマグ溶射  
●溶射上面：エポキシ塗装 + フッ素塗装

## IRABU Steel Brigeでのチャレンジ

Edge form  
⇒ Bending or 3R chamfering

Eye-bolt hangers

Silicon cap

32φ

東京ゲートブリッジにも適用。  
沖縄都市モノレールにも採用予定

