

報告 原子力発電所建設における RC 造と S 造の複合化工法の採用

丹治 郁夫^{*1}・小高 清孝^{*2}・中倉 健介^{*3}

要旨：近年の原子力発電所建設工事では、工期短縮のため、機器配管類をモジュール化・ブロック化した上での建屋内への先行搬入・据付が必須となっている。女川原子力発電所 3 号機建設工事では、これに対応するため、RC 造と S 造を組み合わせた構造・工法を採用し、成果をあげると共に現場作業の軽減を図ることができた。

キーワード：原子力発電所, S+RC 構造, SC 構造

1. はじめに

女川原子力発電所は、宮城県牡鹿郡女川町及び牡鹿町に立地されており、1, 2 号機の営業運転開始を経て、平成 8 年 9 月に 3 号機の建設を着工し、現在建設中である。表-1 に発電所の概要を示し、図-1 に 3 号機の主要建屋（原子炉建屋、タービン建屋、サービス建屋）のレイアウトを示す。

表-1 女川原子力発電所の概要

	1号機	2号機	3号機
電気出力	52万4千Kw	82万5千Kw	82万5千Kw
原子炉型式 (原子炉格納容器)	沸騰水型 軽水炉 マーク I 型	沸騰水型 軽水炉 マーク I 改良型	沸騰水型 軽水炉 マーク I 改良型
工事着工	昭和54年12月	平成 1年 8月	平成 8年 9月
岩盤検査	昭和55年 5月	平成 3年 2月	平成 9年10月
営業運転開始	昭和59年 6月	平成 7年 7月	平成14年 1月 (予定)
主要工期(ヶ月)	50	54	51



図-1 女川 3号機主要建屋レイアウト図

3 号機は、先行機である 2 号機と同じ電気出力を有するが、岩盤検査から運転開始までの主要工期は 2 号機に比べて約 3 ヶ月短い 51 ヶ月を目標としている。そのため、建設工事に際しては、種々の合理化工法や工期短縮のための工法を採用している。

本稿では、女川 3 号機主要建屋の建設工事において、工期短縮や現場作業の軽減・安全性の確保等に大きな効果が得られた RC 造と S 造を組み合わせた複合化工法について報告する。

2. 鉄骨梁と RC 床スラブによる構造

2.1 概要

原子力発電所の主要建屋は、耐震性能上、また遮蔽要求や重量機器を支えるため、従来より鉄筋コンクリート構造（RC 造）を主体とした構造が採用されている。そのため、機器工事側からの機器配管類の先入れによる無支保工化や躯体施工後の早期引渡し要求に対しては、その要求エリアについてのみ、RC 構造の一部を無支保工化する工法を採用していた。具体的には、図-2(1)に示すような、当該部周辺の RC 壁躯体に鉄骨梁を支持するための埋込金物を取付け、仮設の鉄骨梁を設置し、その上にデッキプレートを敷込み、床コンクリート打設用の無支

*1 東北電力(株) 女川原子力発電所建設所 建築課長 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 建設総事業本部東北支店 女川原子力出張所 次長 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 建設総事業本部東北支店 女川原子力出張所

保工型枠を形成する工法（以下、仮設デッキプレート工法と称す。）により対処してきた。この工法には下記のような短所が挙げられる。

- (1) 壁際に仮設鉄骨梁を支持するための埋込金物やブラケットが必要となるため、その取付け作業が必要となる。
- (2) このブラケットが壁より突出するため機器配管類と干渉する場合がある。
- (3) デッキプレート受け仮設鉄骨梁の配置が制約されるため、鉄骨梁と機器配管類との干渉回避が不可能な場合は、床スラブコンクリート打設・硬化後に、干渉する鉄骨を切断・撤去する必要がある。

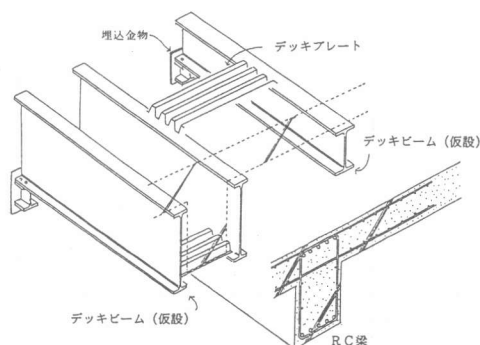
しかし、近年、工期短縮や現場作業の省力化のため、機器工事においては機器配管類のモジュール化、大ブロック化による搬入・据付が進み、早期引渡し要求エリアも建屋の大半を占めるようになってきている。表-2に2号機と3号機の床デッキプレートエリアの比較を示すが、3号機では格段とデッキプレートエリアが増大している。

表-2 床デッキプレートエリアの比較

	原子炉建屋	タービン建屋	サービス建屋 (2号機では 制御建屋)	全建屋
2号機	約 45%	約 20%	約 10%	約 30%
3号機	約 70%	約 90%	約 70%	約 75%

注) 延べ床面積に対するデッキプレートエリア面積の比率を示す。

そこで、女川3号機で採用したのが、図-2(2)に示すようなRC構造を主体としながらも、



(1) 仮設デッキプレート工法

本設の鉄骨梁によりRC床スラブを支える構造（以下、S+RC構造¹⁾と称す。）である。この構造は、構造耐力を発揮するまでの施工期間の短いS造と、遮蔽性能を有しせん断耐力の大きいRC造の両者の特徴を兼ねそなえた構造であり、機器工事側からの無支保工化や早期引渡し要求への対応を容易にしている。

2.2 S+RC構造の特徴と効果

仮設デッキプレート工法とS+RC構造の梁端部支持方法の比較を図-3に示す。

仮設デッキプレート工法では、デッキプレート受けの仮設の鉄骨梁が必要となるうえ、下階壁の施工後でなければ鉄骨梁の敷設はできない。これに対して、S+RC構造では、鉄骨架構を建方すれば、いつでも鉄骨小梁の取付け及びデッキプレートの敷設が可能となるため、早期に安全な作業床が確保でき、機器工事側の要求に対して柔軟な対応が可能である。

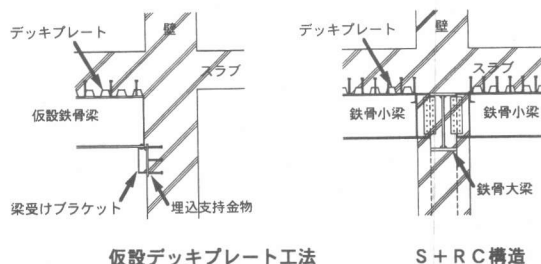
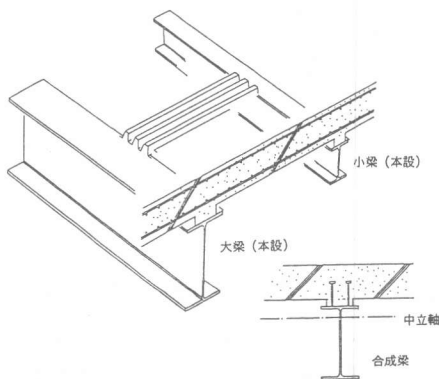


図-3 梁端部支持方法の比較



(2) S+RC構造

図-2 仮設デッキプレート工法とS+RC構造の概要

また、従来は壁及び床スラブ下に数多く設置されていた機器配管サポート用の埋込金物についても、S+RC構造では、支持荷重が軽微であれば鉄骨部材から直接サポートを取ることが可能となるため、資材（埋込金物等のサポート用部材）の低減を図ることができる。

1フロア当りの建設工程の比較を表-3に示す。S+RC構造では従来工法（木型枠・支保工による）における養生及び型枠支保工の解体が不要となるため、機器工事側への明渡しを約0.5～1ヶ月短縮することが可能である。また、デッキプレートにより高所での開口部が少なくなることから、安全性が格段に向上する。

表-3 建設工程の比較

従来工法				
	埋込体工事	養生・型枠解体	床躯体工事	仕上げ工事
S+RC構造				
	埋込体工事	床躯体工事	機器搬入	仕上げ工事

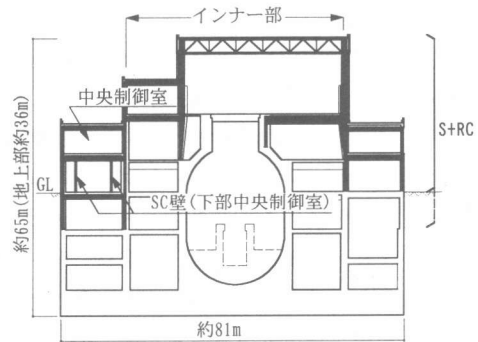
2.3 S+RC構造を採用した部位

女川3号機主要建屋において、S+RC構造を採用した部位を図-4に、機器の先行搬入状況を写真-1に示す。

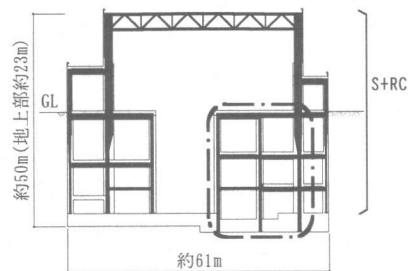
原子炉建屋では、機器工事のための早期引渡し要求や機器配管類の先入れ要求に対処するため、中心部周辺（インナー部）の1階部分を除く地上階全てと地下階の一部に採用した。

タービン建屋では、機器配管類のモジュール化やブロック化の大幅な採用等により建屋全体に採用した。また、建屋周辺の仮設ヤードの関係から建屋内に地下躯体工事のための乗込み構台を必要としたが、建屋の本設鉄骨を構台鉄骨と兼用したことにより、仮設資材の低減に有効であった。

サービス建屋では、機器工事のための早期引渡し要求のある地上階の全てに採用したが、鉄骨梁としての特性を生かした柱の少ない長スパン設計が可能となった。

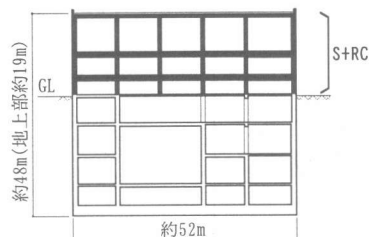


原子炉建屋



□：乗込み構台と兼用した鉄骨部分

タービン建屋



サービス建屋

図-4 S+RC構造採用部位

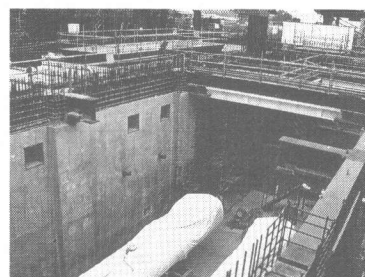


写真-1 機器の先行搬入状況

3. 鋼板コンクリート構造

3.1 概要

鋼板補強コンクリート構造（Steel Plate Reinforced Concrete Structure：以下、SC構造^{1), 2)}と称す。）は、図-5に示すように鋼板より突出させた頭付きスタッドやタイバーなどの連結材により鋼板とコンクリートを一体化させたハイブリッド構造であり、板部材（壁・床スラブ）に適用するために開発されてきたものである。鋼板が座屈拘束されることにより、相互の構造的特徴を生かした構造となっており、高い耐力と優れた靱性を有している。

RC構造とSC構造の構造性能について、同一鋼材比とした場合の主要な許容応力の比較を表-4に示す。RC構造については日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」により、SC構造については文献^{3)~6)}に基づき算定しているが、SC構造はRC構造より高い許容値を示す。

また、SC構造における表面鋼板は鉄筋と型枠の役割を果たしているため、現場での鉄筋・型枠工事が削減される。鋼板パネルは工場での製作となり、現場ではパネルの組立とコンクリートを打設するだけとなるため、工期短縮や現場作業の軽減・安全性確保等の面で大きな効果が期待できる。

女川3号機では、このSC構造の工期短縮等の効果に着目し、耐震設計上考慮していない一部の間仕切壁に採用することとした。

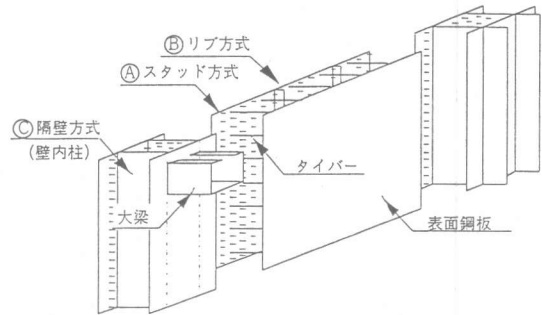


図-5 SC構造の概念図

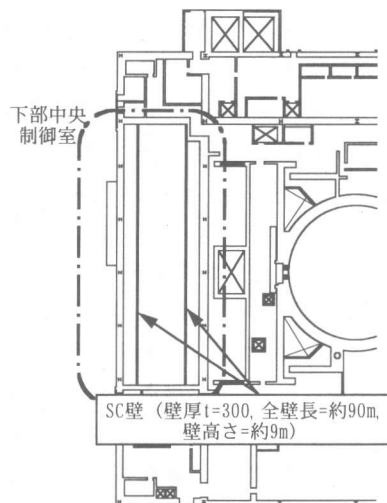
表-4 RC構造とSC構造の許容耐力の比較

設計応力	許容応力		備考
	RC構造	SC構造	
面内せん断	全補強式 $Q_a = A_s \cdot \sigma_y$	累加（合成）強度式 $Q_a = (\alpha + \beta) / \sqrt{3\alpha^2 + \beta^2} \cdot A_s \cdot \sigma_y$ α：鋼板のせん断剛性 β：ひびわれコンクリートのせん断剛性	ただし、SC終局値は高耐力かつ高靱性
曲げ	平面保持仮定 ヤング係数比 $M_a = A_t \cdot f_t \cdot j$ $j = 7/8 \cdot 0.9D$	同 左 $M_a = A_t \cdot f_t \cdot j$ $j = 7/8 \cdot D$	1割程度増
面外せん断	長期 $Q_a = b \cdot j \cdot cfs$ $cfs = (0.5 + \frac{F_c}{100})$	同 以上 長期 $Q_a = b \cdot D \cdot 0.156\sqrt{F_c}$	2割程度増

3.2 SC構造の採用部位と特徴

女川3号機では、原子炉建屋の地上1階及び2階にある中央制御室エリアの機器工事側への早期引渡し要求により、当該躯体工事が建設工程上のクリティカルパスとなっていた。そこで、**図-4**及び**図-6**に示す地上1階の下部中央制御室の間仕切壁（壁厚30cm、壁高約9m）にSC構造を採用することにより、建築工事として約0.5ヶ月の工期短縮を図ることができた。

SC間仕切壁の概要を**図-7**に示すが、コンクリート型枠を兼ねた表面鋼板は厚さ4.5mm（SS400）を使用し、φ13のタイバー（SS400相当）を@300×@300に配置して連結している。また、壁頂脚部はRC壁と同等のアンカー鉄筋で上下階のRC床スラブと接続しており、RC構造と同等の構造耐力を確保した。



1階(OP15.000)平面図

図-6 SC構造の採用部位

3.3 鋼板パネルの製作方法

鋼板パネルの製作方法は、**図-8**に示すように、まず墨出しされた下側（片側）の鋼板裏にタイバーをスタッド溶接する。次に、タイバー頭部上に、溶接用の16mmの穴をあけた上側鋼板を所定位置にセットし、上側鋼板の表側より特殊栓溶接をして接合する。その後に機器配管支持用の埋込金物やスリーブ等を取付け完了することとした。**写真-2**に工場での鋼板パネル製作状況を示す。

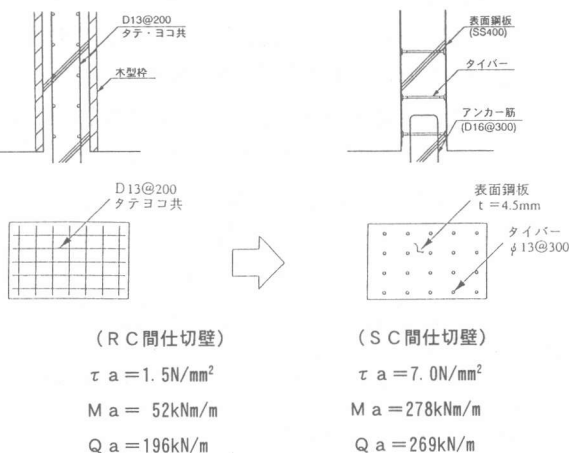


図-7 SC間仕切壁の概要

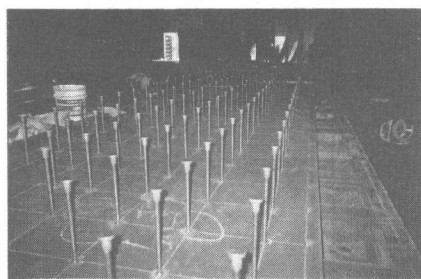


写真-2 工場での鋼板パネル製作状況

3.4 鋼板パネルの施工

鋼板パネルの基本ブロック構成を**図-9**に示す。鋼板パネルは、工場製作後の運搬や現場で

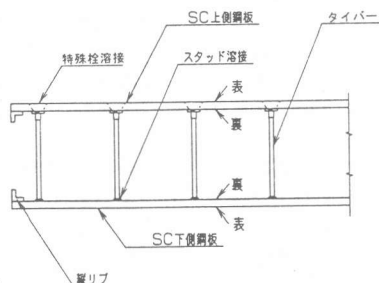


図-8 鋼板パネルの製作概要

の施工性の向上のために、下段パネルと上段パネルに分割し、コンクリート打設後に上下パネルのみを溶接接合している。構造的にはプレキャストRC壁と同様なスリット壁の構成となり、現場での溶接を極力削減できるように配慮した。鋼板パネルの表面は、錆止め塗装（灰色）で仕上げている。

また、コンクリート強度はRC躯体と同じ（ $F_c=33\text{N/mm}^2$ ，スランプ=12cm，流動化後18cm）とし、その充填性については事前にモックアップ試験を実施したが、RC構造と異なり壁内に鉄筋がなくタイバーだけとなるため、非常に良好であることを確認した。写真-3～5に現場での施工状況を示す。

4. まとめ

本稿では、近年の原子力発電所建設工事を取り巻く状況に対応すべく、女川原子力発電所3号機主要建屋の建設工事において採用し、工期短縮や現場作業の軽減等の大きな効果が得られたRC造とS造の複合化工法について報告した。3号機主要建屋は現在建設中ではあるが、2号機と比較して主要工期で約3ヶ月短縮するという当初の目標を十分に満足するものとなっている。

参考文献

- 1) 丹治郁夫ほか：女川原子力発電所3号機建築工事における工期短縮工法について，コンクリート工学，Vol. 37，No. 12，pp. 34～37，1999. 12
- 2) 石川和也ほか：女川原子力発電所第3号機建設工事におけるプレファブ化工法について（その2），日本建築学会大会梗概集，B-2 構造Ⅱ，pp. 1173～1174，1999
- 3) 阿部琢志ほか：鋼板コンクリート構造に関する実験的研究（その1～3），日本建築学会大会梗概集，B-2 構造Ⅱ，pp. 1069～1174，1996
- 4) 北野剛人ほか：鋼板コンクリート構造に関する実験的研究（その4～13），日本建築学会大会梗概集，B-2 構造Ⅱ，pp. 1057～1076，1997
- 5) 船越淳久ほか：鋼板コンクリート構造に関する実験的研究（その14～20），日本建築学会大会梗概集，B-2 構造Ⅱ，pp. 1121～1134，1998
- 6) 宇佐美滋ほか：鋼板コンクリート構造に関する実験的研究（その21～40），日本建築学会大会梗概集，B-2 構造Ⅱ，pp. 1223～1262，1999

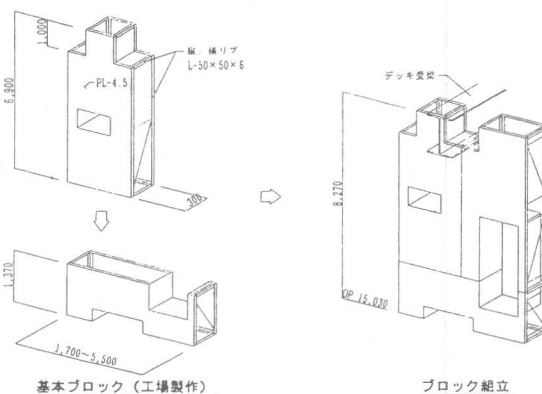


図-9 鋼板パネルの基本ブロック構成

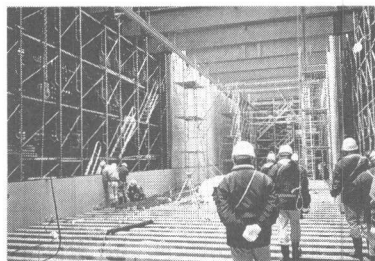


写真-3 鋼板パネル施工状況

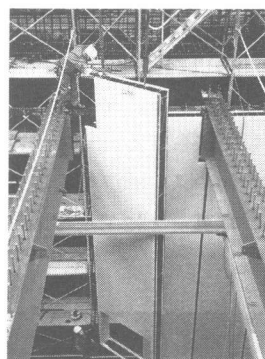


写真-4 鋼板パネルの吊込み

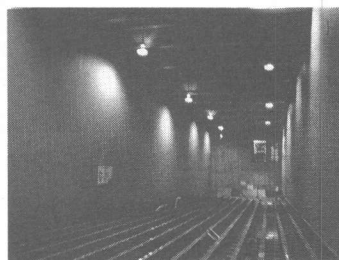


写真-5 SC構造完成