

螺栓紧固方法对大口径管法兰连接件密封特性的影响

1. 前言

带密封垫片的管法兰连接件被广泛应用于各产业的压力容器及配管紧固件中。我们知道不仅是密封垫片的特性会对紧固件的密封特性造成影响，压缩密封垫片的螺栓的紧固方法也会对其密封特性造成影响。根据高压气体保安协会¹⁾的报告，在密封垫片紧固件的泄漏事故中，约67%都是因螺栓紧固不良所造成。造成紧固不良的原因之一为紧固螺栓时产生的弹性相互作用。这是在紧固多个螺栓时会发生的相互影响的现象，各螺栓轴力会低于目标螺栓轴力，而且各螺栓还会存在轴力不均的问题。这个结果就会造成得不到合适的螺栓轴力，因此也就会得不到密封所需的密封垫片压缩力，从而导致发生泄漏。想要完全消除这个弹性相互作用的影响是非常困难的一件事。而为了降低这个影响，我们采取的对策有增加紧固圈数，或是采用对角紧固螺栓的方法等等。但是，这些对策都是基于经验进行的，很难说已经经过了充分的技术性研究^{2)~5)}。

在这样的一种背景之下，近年来为了达到合适的螺栓轴力，会在各标准中提供螺栓紧固的方法。在美国，ASME PCC-1⁶⁾ Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly于2000年提供了螺栓紧固的方案，并在2013年及2019年作了修订。在日本，JIS B 2251⁷⁾“法兰接头紧固方法”于2008年公布。2018年中国公布了“法兰接头安装技术规定”。但是，在这些标准中作为指标的都是最终的螺栓轴力，对于实际需要的连接件的密封特性都未有涉及。

在上一期的Valqua Technology News Vol.37中，使用ASME 150级4英寸小口径和ASME 300级24英寸大口径管法兰连接件，用ASME PCC-1⁶⁾和JIS B 2251⁷⁾的紧固方法对于密封特性造成的影响进行了研究评价，得到了两个方法都能够得到足够密封特性，是合适方法的结论⁸⁾。但是，ASME PCC-1⁶⁾中也有好几种螺栓紧固方法，而这些紧固方法对于连接件密封特性造成

的影响则未有涉及。

在本期技术志中，对ASME 300级24英寸连接件，使用包括了ASME PCC-1⁶⁾中新增的Alternative #1、#2、#3在内的紧固方法，对螺栓轴力的不均、密封特性、螺栓紧固时间及扳手移动距离造成的影响进行研究探讨。在这里，对象密封垫片将使用本公司产品中的高性能密封垫片No.GF300及柔性石墨填料带缠绕式密封垫片No.6596V。

2. 试验方法

2-1) 试验装置

Figure1所示为本研究中使用的带密封垫片的管法兰连接件。尺寸为ASME规格中最大标称直径的24英寸，压力为300等级、形状为W/N、底座为RF、材质为SUS304。我们知道，有管和无管两种状态时，其法兰连接件的力学特性也会发生变化。因此，在本研究中，我们使用了具有约800mm管道的装置，在更加接近实际机器的条件下进行了研究探讨。

试验中，我们使用了24枚SNB7制、标称尺寸M39的六角螺栓。并且，我们还在各螺栓上贴了2片应变仪，可对所有螺栓的轴力进行测量。此外，各螺栓上的应变仪事先都进行了校准，螺栓、螺母的螺纹部位及接合面上都涂覆了二硫化钼。

试验气体使用了氮气，内压为2MPa。通过压力下降法测量连接件的泄漏量。通过压力表测量压力变化，并通过以下公式(1)计算。

$$L=1atm \times \frac{MV}{\rho tRT_c} \left(P_1 - \frac{T_1}{T_2} P_2 \right) \quad (1)$$

此处

- L : 密封垫片外周部位的泄漏量、 $[\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})]$
- M : 摩尔质量、 $[\text{mg}/\text{mol}]$
- V : 管法兰连接件的内容积、 $[\text{ml}]$
- ρ : 试验气体密度、 $[\text{mg}/\text{ml}]$
- t : 测量时间、 $[\text{s}]$
- R : 气体常数 ($=8.314$)、 $[\text{J}/\text{mol} \cdot \text{k}]$
- T_1 : 试验开始时的绝对温度、 $[\text{K}]$
- T_2 : 试验结束时的绝对温度、 $[\text{K}]$
- P_1 : 试验开始时的绝对内压、 $[\text{MPa}]$
- P_2 : 试验结束时的绝对内压、 $[\text{MPa}]$
- c : 密封垫片的接触外径周长、 $[\text{m}]$
- atm : 标准气压($=0.101325$)、 $[\text{MPa}]$

Figure2 所示为管法兰连接件的紧固作业的照片，以扭矩为指标，使用扭矩扳手进行螺栓紧固。目标密封垫片面压如下：密封垫片 No.6596V 为 40MPa、密封垫片 No.GF300 为 25MPa。通过以下公式(2)决定目标扭矩值 T 。Table1 所示为目标密封垫片应力和扭矩。

$$T = K \frac{\sigma_g}{N} A_g d \quad (2)$$

此处

- T : 扭矩、 $[\text{N} \cdot \text{m}]$
- K : 扭矩系数、($=0.135$)
- σ_g : 目标密封垫片应力、 $[\text{MPa}]$
- A_g : 密封垫片接触面积、 $[\text{mm}^2]$
- N : 螺栓根数、 $[\text{根}]$
- d : 螺栓标称直径、 $[\text{m}]$

实验中，在每一圈的紧固中都对螺栓轴力和法兰间隙进行测量。



Figure1 实验中使用的 ASME 300 级 24 英寸管法兰连接件装置的照片



Figure 2 紧固作业的照片

Table 1 目标扭矩、目标螺栓轴力及密封垫片面压

法兰连接件尺寸	Class300 24B	
	No.6596V	No.GF300
密封垫片		
推荐紧固面压 $[\text{MPa}]$	50	35
目标密封垫片应力 $[\text{MPa}]$	40	25
目标螺栓轴力 $[\text{kN}]$	98.4	85.6
目标扭矩 $[\text{N} \cdot \text{m}]$	520	451

2-2) 使用的密封垫片

本实验使用的密封垫片的尺寸如下所示：No.GF300 为 $\phi 612 \times \phi 772 \times t 3.0$ 、No.6596V 为 $\phi 603.2 \times \phi 628.6 \times \phi 685.8 \times \phi 717.6 \times t 4.5$ 。均为 ASME 300 级 24 英寸的直径尺寸。

3. 紧固方法

本实验使用 7 种螺栓紧固方法，对连接件的螺栓轴力的不均、密封特性及紧固时间进行了比较。Table2 所示为各紧固方法，以下对各紧固方法的概要进行说明。

3-1) 基于 JIS B 2251 的紧固方法⁷⁾

在 JIS B 2251 法兰接头紧固方法⁷⁾的 4b) 项中有这样一段陈述，“当法兰螺栓根数在 12 根以上时，应以指定紧固扭矩的 110% 作为目标紧固扭矩。”本研究中，除了 100% 的目标扭矩的情况，还对 110% 的目标扭矩的情况也做了测量及研究。而在 5.3b) 4) 项中则有如下陈述，“使用缠绕式密封垫片时，因密封垫片宽度较窄，容易产生紧固偏向一侧的情况，为了防止这种情况发生需在临时紧固的最后，将所有螺栓的紧固扭矩紧固至目标紧固扭矩的 50%，然后再以顺时针或逆时针方向的紧固步骤进行圆周 1 圈的紧固”。因此，缠绕式密封垫片 No.6596V 和板材密封垫片 No.GF300 的紧固方法是不

同的。此外，在JIS B 2251⁷⁾中，有些情况下还会要求追加紧固，本实验中也实施了追加紧固。

基于JIS B 2251的紧固方法⁷⁾的最大特点是，先仅对4枚(螺栓枚数在24枚以下时)进行临时紧固，然后在正式紧固时则是对所有螺栓采用按照圆周方向绕圈的方式进行紧固。因为正式紧固采用的是单纯的圆周绕圈的紧固方式，因此可以缩短时间，并且还能防止紧固遗漏等问题。

3-2) 基于ASME PCC-1的紧固方法⁶⁾

ASME PCC-1⁶⁾不同于JIS B 2251⁷⁾，其紧固方法不会因为密封垫片种类的不同而发生变化。本次实验的对象为很早以前就已提出的Legacy、及从2013年起新提出的Alternative #1、#2、#3。

Legacy对所有的螺栓均采用对角紧固的方式，是最为

广泛采用的紧固方法，但它也被指太过耗时。

Alternative #1和#2的方法则是通过在Step1和Step2中对不同的4根螺栓分阶段地提升其扭矩的方式，来减少初期阶段需要紧固的螺栓根数。

Alternative #3则与JIS B 2251⁷⁾相同，先是对4根螺栓进行临时紧固，之后再按照圆周方向绕圈进行紧固。

在ASME PCC-1⁶⁾的4种紧固方法的最后一步中都有如下的描述，“直到螺母不再转动为止”。Table2中所记载的紧固圈数为本实验中螺母不再转动的圈数结果。

3-3) 3 Rounds紧固方法

在JIS B 2251及ASME PCC-1的紧固方法之外，还对分阶段实施3圈对角紧固的简便方法也进行了研究。

Table2 本实验中使用的螺栓紧固方法

	目标扭矩	密封垫片		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	合计
JIS B 2251 110%	110%	No.6596V	螺栓数目	4	24	24	24	232 bolts
			紧固圈数	4	1	6	2	
			顺序	对角	圆周绕圈	圆周绕圈	圆周绕圈	
		No.GF300	螺栓数目	4	24	24	—	208 bolts
			紧固圈数	4	6	2		
			顺序	对角	圆周绕圈	圆周绕圈		
JIS B 2251 100%	100%	No.6596V	螺栓数目	4	24	24	24	232 bolts
			紧固圈数	4	1	6	2	
			顺序	对角	圆周绕圈	圆周绕圈	圆周绕圈	
		No.GF300	螺栓数目	4	24	24	—	208 bolts
			紧固圈数	4	6	2		
			顺序	对角	圆周绕圈	圆周绕圈		
ASME Legacy	100%	No.6596V No.GF300	螺栓数目	24	24	24	—	216 bolts
			紧固圈数	3	3	3		
			顺序	对角	圆周绕圈	圆周绕圈		
ASME Alt.#1	100%	No.6596V No.GF300	螺栓数目	4	16	24	24	120 bolts
			紧固圈数	2	1	1	3	
			顺序	对角	对角	对角	圆周绕圈	
ASME Alt.#2	100%	No.6596V No.GF300	螺栓数目	4	16	24	24	120 bolts
			紧固圈数	2	1	1	3	
			顺序	对角	对角	对角	圆周绕圈	
ASME Alt.#3	100%	No.6596V No.GF300	螺栓数目	4	24	—	—	108 bolts
			紧固圈数	3	4			
			顺序	对角	圆周绕圈			
3rounds	100%	No.6596V No.GF300	螺栓数目	24	—	—	—	72 bolts
			紧固圈数	3				
			顺序	对角				

4. 实验结果

4-1) 法兰面间隙分布

Figure3所示为使用7种方法进行紧固时的法兰面间隙分布。使用的密封垫片为No.GF300的结果使用实线表示，No.6596V的结果使用虚线表示。密封垫片为No.GF300时受紧固方法的影响较为轻微。另一方面，No.6596V时使用基于JIS B 2251⁷⁾和ASME PCC-1⁶⁾标准的方法时得到了几乎相同的结果，但使用3rounds方法时间隙稍大、压缩量较小。

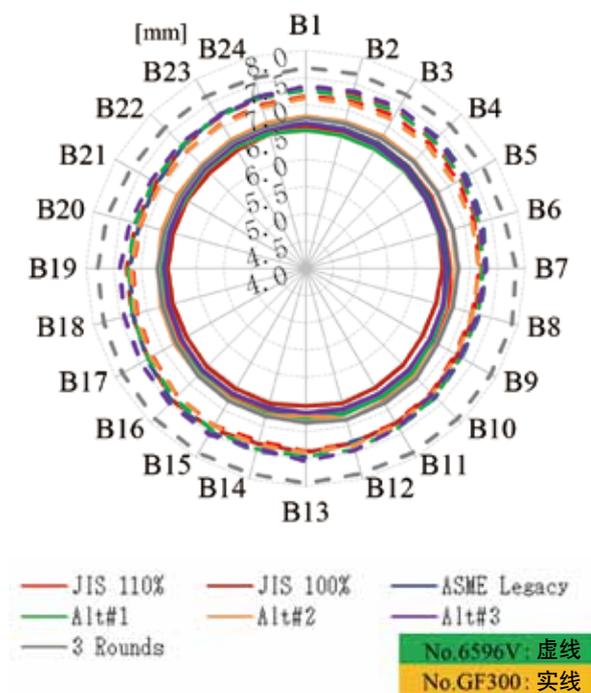


Figure3 法兰面间隙分布

4-2) 螺栓轴力分布

Figure4及Figure5所示的为使用No.GF300密封垫片时，各自最终螺栓轴力分布及轴力不均的情况。各紧固方法下，都出现了基于弹性相互作用的轴力不均问题。尤其是3 Rounds方法时不均较大，紧固系数 $Q (=F_{max}/F_{min})$ 为2.62。关于最小螺栓轴力 F_{min} ，因受弹性相互作用的影响，所有紧固方法下都未达到目标螺栓轴力85.6kN。据此，JIS110% (Table2)时 Q 值为1.31，Alt#3时 $Q=1.33$ ，显示为最小值。

Figure6及Figure7所示的为使用No.6596V密封垫片时，各自最终螺栓轴力分布及轴力不均的结果。与No.GF300时相同使用3 Rounds方法时不均问题较为显著，3根中有1根的螺栓轴力为零。Figure7中， Q 值为JIS110%时 $Q=1.47$ ，显示为最小值。此外，还显示出No.6596V紧固的 Q 值比No.GF300紧固的 Q 值更大。

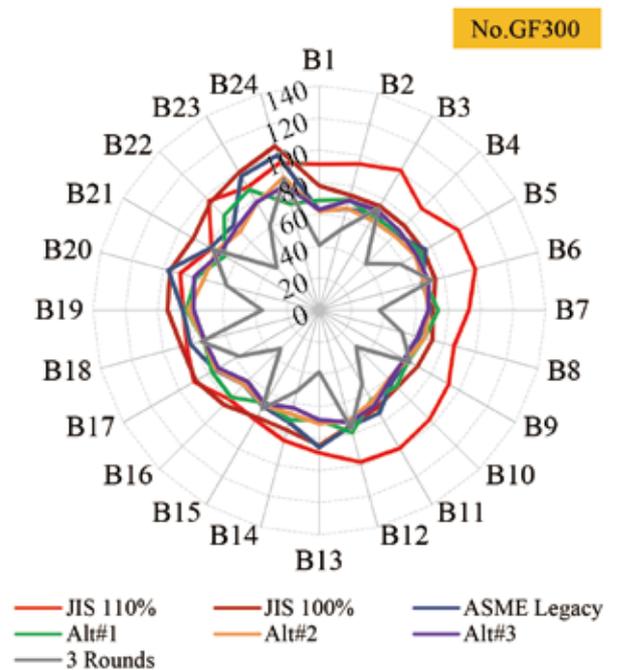


Figure4 螺栓轴力分布(No.GF300)

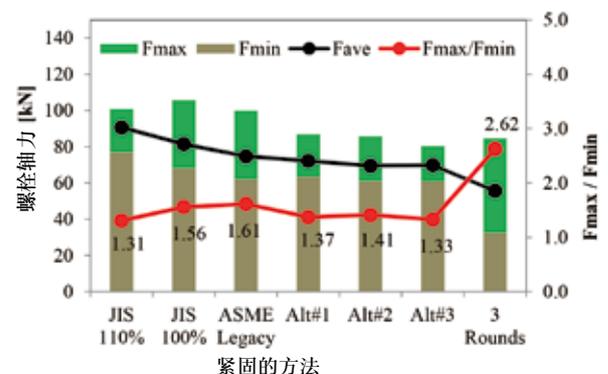


Figure5 螺栓轴力的不均(No.GF300)

No.6596V

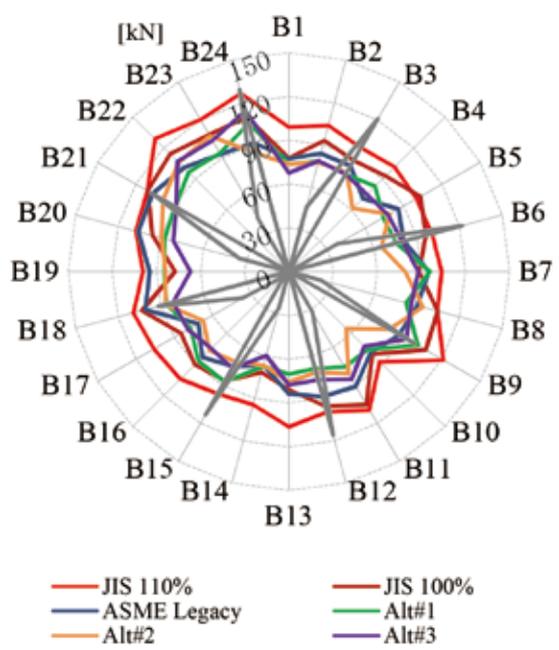


Figure6 螺栓轴力分布(No.6596V)

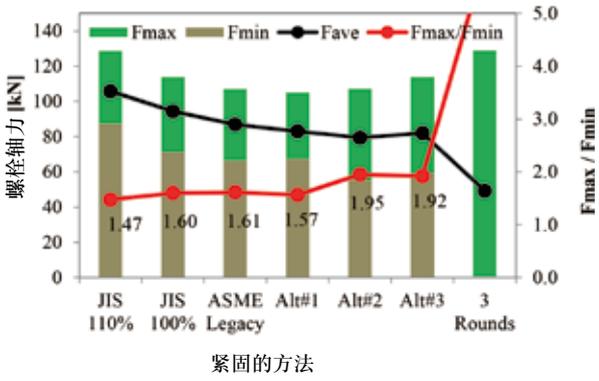


Figure7 螺栓轴力的不均(No.6596V)

4-3) 密封特性

Figure8所示为使用各方法紧固后的管法兰连接件泄漏量的测量结果。各紧固方法下，使用No.GF300密封垫片时的连接件均比使用No.6596V时的连接件的泄漏量较小。此外，该图中还同时标有24根螺栓的最小螺栓轴力 F_{min} 。对各紧固方法下的泄漏量进行比较后，发现最小螺栓轴力越大，泄漏量就越小。反言之，最小螺栓轴力越小，局部密封垫片接触应力越小，泄漏量越大。也就是说，这表示最小的密封垫片接触应力对于泄漏量造成的影响较大。在带密封垫片的管法兰连接件中，部分情况下当螺栓轴力较低时，可能容易从其附近的密封垫片接触

面发生泄漏。这表示要想提升密封特性，尽量增大最小螺栓轴力是非常重要的。

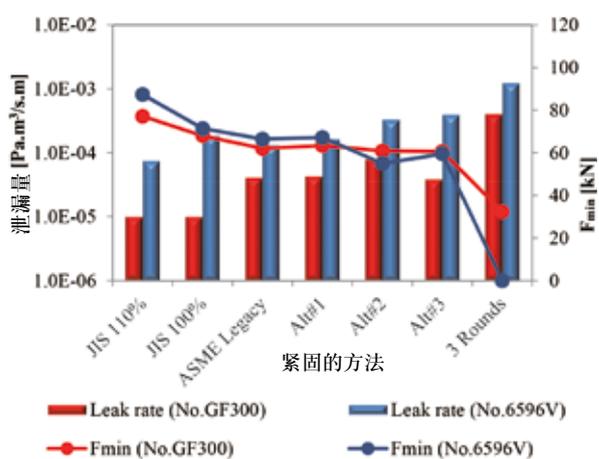


Figure8 密封特性

4-4) 扳手的移动距离

Figure9所示为使用6种紧固方法连接时的扳手的移动距离。移动距离并非是螺栓孔间的直线距离，而是沿圆周的最短距离计算得出的结果。JIS B 2251及ASME Alt#3的移动距离相对较短。3 Rounds方法时，虽然紧固螺栓数目最少，但其移动距离却是最长的。可以说存在以下倾向，即沿圆周方向绕圈紧固较多的紧固方法，其移动距离较短，而对角紧固较多的紧固方法则移动距离较长。

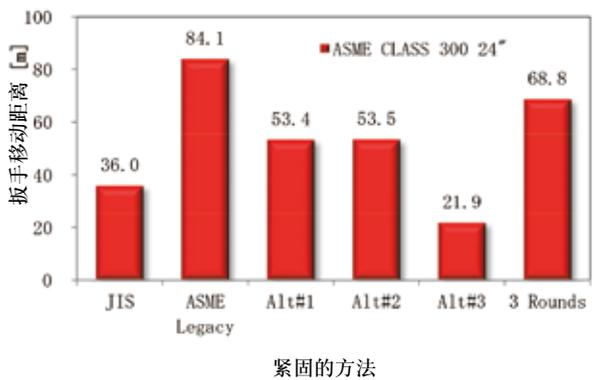


Figure9 扳手的移动距离

4-5) 紧固时间

Figure10所示的为6种紧固方法各自所需的紧固时间。本实验中，虽然在紧固作业中对法兰面间隙进行了测量，但Figure10所示的结果中并未包含间隙测量时间。紧固螺栓数目较多的JIS B 2251⁷⁾及ASME PCC-1⁶⁾ Legacy的紧固时间较长，紧固螺栓数目较少的3

Rounds 紧固方法的紧固时间最短。此处使用了扭矩扳手，若使用液压扳手、扭矩张紧器等工具，则工具及现场环境的不同可能会造成紧固时间发生巨大变化。

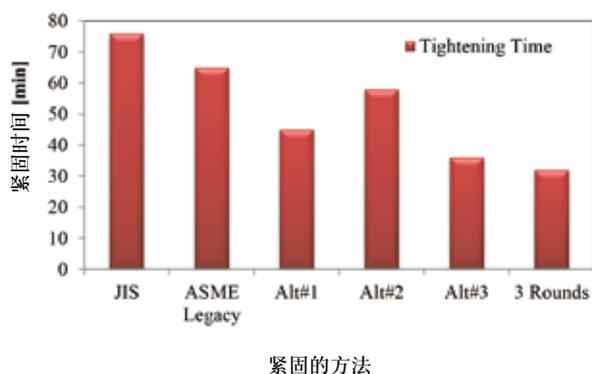


Figure10 紧固时间

5. 总结

在本技术志中，使用大口径管法兰连接件，对No. GF300 及No.6596V的2种密封垫片，就使用7种紧固方法进行紧固时的密封特性、法兰间隙、螺栓轴力、扭矩扳手的移动距离及紧固时间进行了测定，并得到了以下结果。

- (1) 无论使用何种紧固方法，法兰间隙分布都没有太大的差异。
- (2) 管法兰连接件的密封特性受到紧固方法的影响，JIS B 2251⁷⁾ 110% 的紧固方法下，泄漏量最小。接下来是JIS B 2251⁷⁾ 100%。3 Rounds紧固方法虽然简便，但密封特性最差。
- (3) 管法兰连接件的密封特性受到最小螺栓轴力的影响，尽量增大最小螺栓轴力对于提升密封特性极其重要。
- (4) 固方法方面，对角紧固较多时存在扭矩扳手移动距离较长的倾向，而紧固次数较多的紧固方法则存在紧固时间较长的倾向。
- (5) JIS B 2251⁷⁾及ASME PCC-1⁶⁾ Legacy、Alt#1的泄漏量相对较少，但所需的紧固时间较长。3 Rounds方法的泄漏量相对较大，但它的紧固时间却是JIS B 2251⁷⁾的一半以下。

6. 结语

美国机械工程师协会(ASME)引入了紧固效率 η (assembly efficiency)因子。 η 为达成的所有螺栓轴力和目标螺栓轴力的比，其值比1小。也就是说，在实际的设计施工中要设得大一点，即需要在螺栓轴力的目标值的基础上再乘上 $1/\eta$ 。JIS B 2251⁷⁾ 110%的基本思路为加大10%进行紧固。但是，这是螺栓轴力基准，我们知道它并不一定正确，也有建议使用泄漏量基准的紧固效率的方案⁹⁾。我们认为还有向以所追求的密封垫片连接件的密封特性为指标的，更具效率的紧固方法做改良的余地。希望这个实验研究能够对工厂成套设备的紧固作业有所帮助。

此外，本实验中还得到了三菱化学株式会社森本吏一的建议和意见。特在此表示感谢。

7. 参考文献

- 1) 村松晃“，体验型密封施工研修中心密封培训中心”，Valqua Technology News Vol. 33,(2017)
- 2) H. Lejeunt, Y. Birembaut, Alexander Riedl, Arne Schunemann, “Investigation on Different Tightening Procedures on Several Bolted Flange Types, dimensions and Their Associated Gasket Types”, PVP2011-57525, Proceeding of ASME PVP 2011 Conference, (2011)
- 3) H. Gong, Russell R. Flocken, “Study of Bolt Tightening Methods Using Load Indicating Bolts”, PVP2016-63723, Proceeding of ASME PVP 2016 Conference, (2016)
- 4) H. Gong, Wesley Pudwill, Elysia J. Sheu, “Study of Alternative Assembly Patterns Using Finite Element Analysis and Lab Tests”, PVP2018-84465, Proceeding of ASME PVP 2018 Conference, (2018)
- 5) W. Brown, “Efficient Assembly of Pressure Vessel Bolted Joints”, PVP2004-2635, PVP-Vol. 478, Analysis of Bolted Joints, (2004)
- 6) ASME PCC-1, “Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly”, (2013)
- 7) Japanese Industrial Standards. JIS B 2490“法兰接头紧固方法”,(2008)

- 8) 藤原隆宽“，紧固步骤对密封特性的影响”，Valqua Technology News Vol. 37,(2019)
9) X. Zheng, K. Sato, T. Fujihara, Y. Akamatsu, T. Sawa, “Effect of Tightening Procedure on

the Sealing Performance of Bolted Gasketed Pipe Flange Connections”, PVP2019-93497, Proceedings of ASME PVP 2019 Conference, (2019)



郑 兴
中国综合研究所
密封工程开发组



佐藤 广嗣
研究开发本部
第1商品开发部



藤原 隆宽
研究开发本部
第1商品开发部



泽 俊行
广岛大学 名誉教授